



# Métrologie et modélisation de l'aspect pour l'inspection qualité des surfaces

Gilles Pitard

## ► To cite this version:

Gilles Pitard. Métrologie et modélisation de l'aspect pour l'inspection qualité des surfaces. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAA005 . tel-01357821

**HAL Id: tel-01357821**

**<https://theses.hal.science/tel-01357821>**

Submitted on 30 Aug 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **THÈSE**

Pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

**Gilles Pitard**

Thèse dirigée par **Maurice Pillet et Hugues Favrelière**

préparée au sein du **Laboratoire SYMME : SYstème et Matériaux pour la MÉcatronique**

et de l'école doctorale **SISEO : Science et Ingénierie des Systèmes de l'Environnement et des Organisations**

## **Métrologie et modélisation de l'aspect pour l'inspection qualité des surfaces**

Thèse soutenue publiquement le **19 mai 2016**,  
devant le jury composé de :

**M. Patrick Charpentier**

Professeur, CRAN, ENSTIB, Président

**M. Alamin Mansouri**

Professeur, LE2I, Université de Bourgogne, Rapporteur

**M. Joël Rech**

Professeur, LTDS, ENISE, Rapporteur

**M. Gaëtan Le Goïc**

Maître de conférences, LE2I, Université de Bourgogne, Examineur

**M. Serge Samper**

Professeur, SYMME, IPR de Rennes, USMB, Invité

**M. Laurent Gwinner**

Expert industriel, Comité Francéclat, CETEHOR, Besançon, Invité

**M. Stéphane Maniglier**

Expert industriel, CETIM-CTDEC, Cluses, Invité

**M. Maurice Pillet**

Professeur, SYMME, USMB, Directeur de thèse

**M. Hugues Favrelière**

Maître de conférences, SYMME, USMB, Co-Directeur de thèse







## Avant-propos

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre du projet *Measuring Surface Appearance* (MeSurA), soutenu par le pôle de compétitivité Mont-Blanc Industries et par le Conseil Départemental de Haute-Savoie.

La figure 1 présente l'historique des recherches menées au sein du laboratoire SYMME depuis une quinzaine d'années dans le but de mieux maîtriser la qualité *géométrique* et *esthétique* des produits. Cette activité permet de proposer de nouvelles façons de spécifier la conformité d'un produit dans le domaine de la métrologie des formes d'une part, et dans le domaine de la qualité d'aspect d'autre part.

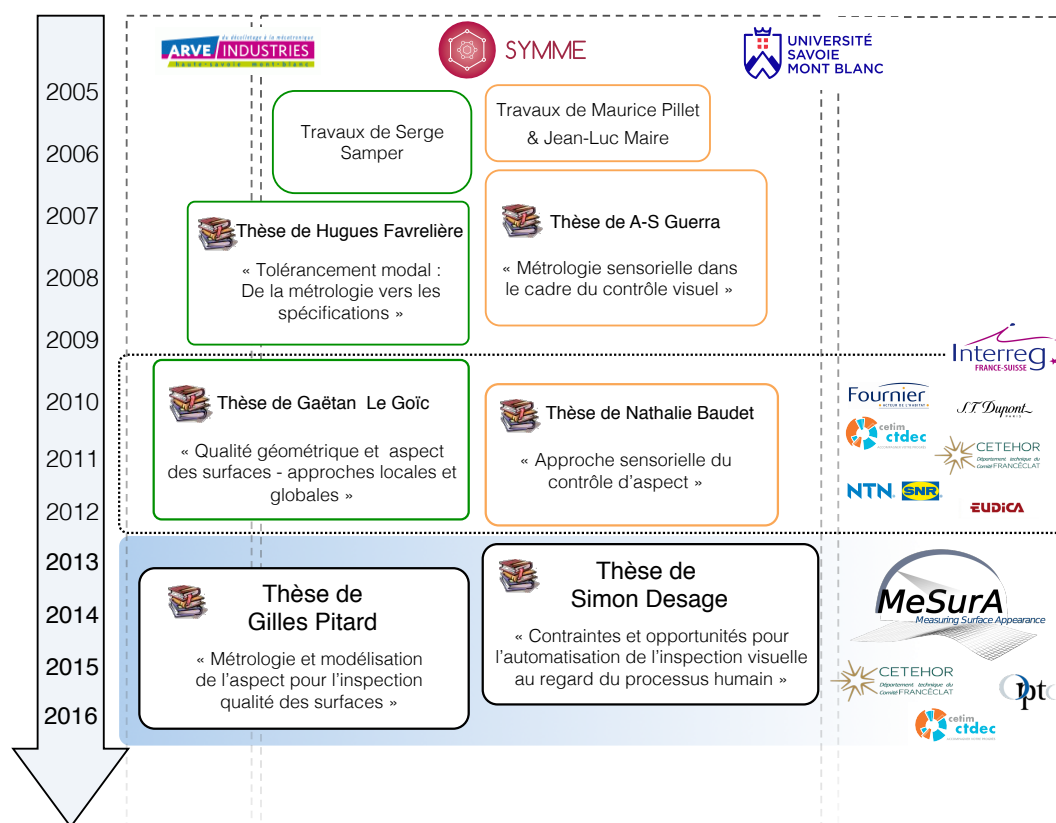


FIGURE 1 – Historique des recherches sur la maîtrise de qualité géométrique et esthétique des produits, au laboratoire SYMME

Cette étude a été initiée à partir des précédents travaux de doctorat de Nathalie Baudet [Baudet 12] sur la formalisation et la modélisation du processus humain du contrôle qualité des produits en industrie, ainsi que des résultats de doctorat de Gaëtan Le Goïc [Le Goïc 12], qui ont permis une innovation majeure dans le cadre du contrôle de qualité d'aspect des surfaces grâce à la mise en œuvre de nouvelles méthodes consacrées à la modélisation de l'apparence et le rendu des surfaces, telles que les techniques connues sous la désignation *Reflectance Transformation Imaging*(RTI).

A l'issue d'une première collaboration dans le cadre du projet Européen INTERREG IV terminé en décembre 2012, le laboratoire SYMME, le département technique du comité Francéclat (CETEHOR), le Centre Technique du Décolletage (CTDEC) récemment associé au Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), et enfin la société OPTO ont décidé de s'associer afin de développer à la fois le matériel et les méthodes pour aller vers l'automatisation de l'inspection et l'analyse de l'aspect des surfaces. L'objectif est de concevoir plusieurs dispositifs pré-industriels de la qualité des surfaces, fondés sur cette innovation.

Les partenaires industriels et les acteurs universitaires du projet apparaissent sur la figure 2. La société OPTO à Annecy est spécialisée dans la conception, le développement et la vente de composants, de systèmes et de modules optomécatroniques pour la vision et l'imagerie. Le Comité Francéclat à Besançon mène des actions collectives au profit des secteurs de l'horlogerie, de la bijouterie, de la joaillerie, de l'orfèvrerie et des arts de la table afin de contribuer au développement de ces filières. Le Centre Technique du Décolletage à Cluses est un expert reconnu par les entreprises de décolletage et de mécanique pour ses travaux menés sur l'usinage, les méthodes de fabrication, la métrologie dimensionnelle, les matériaux, les procédés innovants ; les résultats de ces projets sont mis à disposition de ses clients et ressortissants au travers de transfert technologique, d'actions de formation, de diffusion d'informations et de participation à des commissions de normalisation.



FIGURE 2 – Logos des partenaires du projet MeSurA

Deux doctorats ont été menés parallèlement sur la période de 2013 à 2016 dans le cadre du projet MeSurA qui abordent les problématiques liées à la maîtrise de l'apparence des surfaces selon des approches différentes. Les travaux de doctorat de Simon Désage [Desage 15a] (thèse soutenue le 24 Novembre 2015) fournissent des développements aux méthodes en traitement d'images, qui manipulent une image unique de la scène pour extraire des attributs (opérateurs de segmentation, de classification, ...). L'originalité est de proposer une adaptation de différents traitements morphologiques d'images à la nature des données d'acquisition de type RTI [Desage 14] qui offre une représentation plus riche de la texture visuelle d'une surface, par adjonction de la dépendance aux directions d'éclairage.

# Table des matières

Introduction . . . . .	1
L'objet des travaux . . . . .	2
Structuration du document . . . . .	3
<b>1 Acquisition et modélisation de l'aspect des surfaces</b>	<b>5</b>
1.1 Analyse de l'aspect des surfaces . . . . .	6
1.1.1 Etats de surface & Aspects de surface . . . . .	6
1.1.2 Textures surfaciques . . . . .	10
1.1.3 Anomalies d'aspect . . . . .	10
1.1.4 La saillance . . . . .	11
1.2 Interactions de la lumière avec la surface . . . . .	13
1.2.1 La luminance . . . . .	13
1.2.2 Réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion mixte . . . . .	15
1.2.3 Fonction de répartition bi-directionnelle du coefficient de luminance (BRDF) . . . . .	17
1.2.4 Mesure et modélisation du coefficient de luminance bi-directionnel . . . . .	17
1.3 Reflectance Transformation Imaging . . . . .	19
1.3.1 Spécification des données stéréo-photométriques RTI . . . . .	20
1.3.2 Modèles RTI existants . . . . .	21
1.3.3 Comment les méthodes RTI traitent la couleur ? . . . . .	24
1.4 Altitudes, pentes et courbures de la surface . . . . .	25
1.4.1 Relation entre la luminance et la normale à la surface . . . . .	25
1.4.2 Estimation robuste de la normale dans le cas des surfaces réelles . . . . .	28
1.4.3 Information en courbure . . . . .	29
1.4.4 Applications de la mesure des courbures . . . . .	31
1.5 Conclusion . . . . .	33
<b>2 Dispositif d'acquisition MeSurA</b>	<b>35</b>
2.1 Introduction . . . . .	36
2.2 Développements matériels . . . . .	36
2.2.1 Architecture des dispositifs RTI . . . . .	36
2.2.2 Sphère MeSurA . . . . .	38
2.2.3 Etalonnage et maîtrise des incertitudes . . . . .	45
2.2.4 Répétabilité, reproductibilité et stabilité . . . . .	48

2.2.5	Capabilité . . . . .	49
2.3	Développements logiciels . . . . .	51
2.3.1	Logiciels RTI . . . . .	52
2.3.2	Formalisation du processus d'inspection . . . . .	53
2.4	Conclusion . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Modélisation de l'aspect par l'approche modale</b>	<b>57</b>
3.1	Approximation des surfaces de luminance par la DMD . . . . .	58
3.1.1	Principe . . . . .	58
3.1.2	Base de projection . . . . .	58
3.1.3	Reconstruction . . . . .	59
3.2	Performances des approximations RTI . . . . .	60
3.2.1	Protocole d'évaluation et de comparaison RTI . . . . .	61
3.2.2	Mesures visuelles et subjectives . . . . .	61
3.2.3	Mesures objectives : PSNR et de SSIM . . . . .	63
3.2.4	Paramètres statistiques de forme, calculés sur les distributions des luminances . . . . .	63
3.3	Conclusion . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Mesure de similarité de l'aspect des surfaces</b>	<b>69</b>
4.1	Introduction . . . . .	70
4.2	Problématique liée à la mesure de similarité . . . . .	71
4.3	Paramétrage modal invariant à la rotation . . . . .	73
4.3.1	Principe . . . . .	73
4.3.2	Invariance à l'orientation de la surface . . . . .	74
4.3.3	Invariance à l'anisotropie de la texture . . . . .	75
4.4	Mesure de similarité de l'aspect des surfaces . . . . .	79
4.4.1	Distance de Mahalanobis . . . . .	79
4.4.2	Mise en œuvre pour la détection des anomalies . . . . .	80
4.4.3	Applications de la méthode sur plusieurs surfaces réelles . . . . .	84
4.5	Evaluation des anomalies d'aspect . . . . .	86
4.5.1	Pré-traitements . . . . .	86
4.5.2	Groupes d'attributs . . . . .	87
4.5.3	Typologie d'anomalie . . . . .	88
4.5.4	Niveaux de luminance et contraste de luminance . . . . .	89
4.5.5	Saillance d'une anomalie . . . . .	90
4.5.6	Cartographie de la visibilité d'une anomalie en fonction des directions d'éclairage . . . . .	91
4.6	Conclusion . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Analyse en pentes et en courbures</b>	<b>94</b>
5.1	Introduction . . . . .	95
5.2	Calcul et choix des indicateurs de pente et de courbure . . . . .	96
5.2.1	Des normales aux courbures . . . . .	96
5.2.2	Indicateurs de courbures équivalentes . . . . .	97
5.2.3	Pentes et courbures directionnelles . . . . .	101
5.3	Estimation des pentes et des courbures par stéréophotométrie . . . . .	103
5.3.1	Systèmes et méthodes d'acquisition . . . . .	103
5.3.2	Echantillons d'application . . . . .	104

5.3.3	Comparaison des approches . . . . .	106
5.3.4	Autres applications . . . . .	110
5.4	Caractérisation des types de forme de la microstructure . . . . .	111
5.4.1	Association des normales et de la forme locale . . . . .	112
5.4.2	Indice de forme (Shape Index) et intensité de courbure (Curvedness) . . . . .	113
5.4.3	Approche multi-échelle : courbures et aspect des surfaces . . . . .	114
5.5	Conclusion . . . . .	116
<b>Conclusion et perspectives</b>		<b>118</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>124</b>
<b>A Annexes</b>		<b>136</b>
A.1	Relations de récurrence pour calculer les polynômes associés de Legendre . . . . .	137
A.2	Espace des descripteurs de l'approche modale . . . . .	138
<b>Communications associées à ces travaux</b>		<b>140</b>



## Introduction

La compréhension des mécanismes qui entrent en jeu dans la perception des surfaces fait l'objet d'une multiplicité d'approches à l'image des applications auxquelles elles sont destinées. Elle intéresse de nombreux secteurs industriels (aéronautique, automobile, emballage, joaillerie, horlogerie, plastique), la cosmétique, le patrimoine, les technologies de l'image, etc. La maîtrise de l'aspect des surfaces, aussi appelée **l'ingénierie d'aspect** [Eterradossi 11], couvre de nombreuses disciplines scientifiques très variées telles que les techniques instrumentales, la métrologie, la mécanique, le traitement d'image, l'analyse sensorielle ou bien encore les neurosciences et psychosciences, dans le but commun de déterminer des grandeurs physiques pertinentes de quantification de l'aspect. Cette objectivation d'une mesure de l'aspect généralement subjective, peut sembler difficile car la perception visuelle des surfaces est un processus inconscient et complexe qui sélectionne parmi un large éventail de représentations antérieures (notre connaissance, notre expérience) et dépend des tâches en cours (nos objectifs, nos attentes, nos émotions). Cependant, la qualité perçue des surfaces procède également d'une notion sensorielle qui relève d'axes métrologiques et physiques, en lien avec les composantes des stimuli mesurables instrumentalement. Le choix des mesurandes nécessite dès lors une bonne compréhension des interactions multi-physiques (lumière, matériau, état de surface, réflectance, etc) entrant en jeu dans la perception des surfaces.

Une métrologie et une modélisation objective de l'aspect des surfaces doivent par ailleurs être opérationnelles, c'est-à-dire que cette recherche ne peut pas se faire isolément sans considérer les besoins et les contraintes des entreprises, ainsi que leurs pratiques actuelles. En entreprise, la qualité des surfaces est indissociable de la notion d'écarts. La définition de tolérances d'acceptabilité d'un produit est un moyen d'établir les spécifications du produit. Elles font appel à l'utilisation d'un langage établi entre les différents acteurs intervenant dans le cycle de vie du produit : le concepteur, le fabricant, et le métrologue. Ainsi dès la conception et la création du produit, l'objectif est de minimiser les écarts entre la qualité attendue [Gotlieb 94] et la qualité perçue par le client [Balin 07]. L'humain reste souvent la référence pour qualifier l'aspect d'une surface et décider de son acceptabilité, en raison de sa grande flexibilité vis-à-vis du type de pièce et des anomalies d'aspect. Celles-ci ne peuvent généralement pas être listés de manière exhaustive. C'est une des raisons pour lesquelles le contrôle sensoriel est la pratique la plus répandue en industrie pour inspecter les surfaces des produits. Le développement de la méthodologie a fait l'objet de nombreux travaux qui ont permis de réduire significativement la variabilité inhérente au contrôle sensoriel humain (visuo-tactile).

Dans certains cas, il est possible d'établir une méthode objective de quantification d'attributs de l'aspect qui aboutit aux développements d'instruments de mesure performants pour leur contrôle (cas des techniques de colorimétrie). Le principe général est le suivant. L'aspect naît de l'interprétation du système visuel humain de stimulus physique. Le stimulus physique tire son origine de la répartition géométrique de la lu-



mière lors de la réflexion lumineuse sur une surface. Ces propriétés de réflexion peuvent être mesurées quantitativement à l'aide d'équipement adapté dont les données sont rassemblées dans la fonction de répartition bi-directionnelle du coefficient de luminance, plus connue sous son acronyme anglais, BRDF [Nico-demus 77, Koenderink 96a] qui fournit une cartographie de la lumière réfléchie à la surface d'un échantillon. Le lien entre ces données physiques et la sensation en lien avec les attributs d'aspect (couleur, brillant, texture, etc.) relève du domaine de la psychophysique. Elle regroupe différentes techniques [Bonnet 86] qui nécessitent « *d'un côté un ensemble de stimuli présentés dans des conditions parfaitement contrôlées, et de l'autre, un observateur qui a pour consigne de donner un certain nombre de réponses simples que l'on enregistre* » [Obein 03]. Si on lie les deux approches par un modèle, l'objectif serait d'accéder à une métrologie de l'aspect totale pour estimer l'aspect à partir du stimulus. Nous ne rentrons pas dans ce mémoire dans le détail des méthodes psychophysiques. La mesure de ce qu'un observateur voit réellement et ressent lorsqu'il regarde une surface consiste donc à mettre en relation les entrées (stimuli physiques) et la sortie (sensation) du système visuel humain.

## L'objet des travaux

L'objectif de ces travaux est d'aider les experts et les contrôleurs à évaluer la qualité des surfaces de manière répétable et reproductible, et d'aller ensuite vers l'automatisation du processus d'inspection visuelle. Notre démarche vise à concevoir une solution qui convient pour de nombreuses applications industrielles. En conséquence, le système d'acquisition et les méthodes de modélisation de l'apparence proposés, sont conçus afin de garantir leur compatibilité avec le contexte industriel en permettant par exemple la compression des données et une représentation des mesures qui doit corrélérer autant qu'elle le peut avec la sensation visuelle humaine.

D'un point de vue métrologique, la quantité pertinente pour mesurer l'aspect est la fonction de répartition bi-directionnelle du coefficient de luminance (BRDF) qui permet de caractériser complètement la lumière réfléchie à la surface de l'échantillon. Elle est captée par le système visuel humain à des échelles suffisamment fines et elle est interprétée de façon immédiate par le cerveau qui élabore à partir de cette mesure, des attributs de l'aspect : régularité d'une texture, uniformité de la couleur, qualité du brillant, saillance d'une anomalie, etc. Sans entrer dans les détails de sa mesure, l'acquisition de la BRDF n'est pas facile d'accès. Il est parfois nécessaire d'extraire de la BRDF un nombre réduit de mesures utiles car la somme des données sensorielles serait trop grande pour être complètement traitée en détail. Cette réduction de la mesure de la BRDF va dans le sens du mode d'investigation du système visuel humain car celui-ci n'a pas besoin de réaliser une mesure complète de la BRDF pour être capable de reconnaître les surfaces et de les analyser.

Partant de cette constatation, nous avons développé un dispositif et des méthodes pour l'inspection visuelle des surfaces industrielles. L'approche consiste à modéliser les interactions de la lumière avec la surface à partir d'images réelles de la surface prises au moyen de caméra, selon le principe des techniques appelées *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) qui permettent d'obtenir simultanément :

- une estimation réduite et simplifiée de la composante angulaire de la BRDF (*approche lumière*),
- une estimation directe des normales, et des courbures à la surface (*approche géométrique*).

Le dispositif automatisé d'acquisition permet d'obtenir pour chaque pixel un ensemble de valeurs discrètes (luminances) associées à chaque incidence d'éclairage du dispositif d'acquisition. Une estimation réduite de la composante angulaire du coefficient de luminance bi-directionnel (BRDF) est réalisée pour chaque micro-facette constituée par un pixel, en associant à ces valeurs discrètes un modèle géométrique continu d'approximation de forme. On parlera de *surface de luminance* pour désigner la surface modélisée qui enveloppe les valeurs discrètes de luminance mesurée. Les surfaces de luminance fournissent une représentation 3D de la répartition angulaire de la lumière réfléchie par la surface. Cette paramétrisation

permet alors de reconstruire virtuellement le rendu de la surface associé à une direction d'éclairage choisie, et ainsi de mettre en évidence les micro-géométries de surface. Cette démarche permet plus particulièrement de mieux décrire le comportement lumineux local au niveau des ruptures de continuité de forme et de réflectivité associées à la présence d'anomalies d'aspect.

Cette modélisation locale de l'interaction surface/lumière peut être réalisée en appliquant différentes paramétrisations géométriques, comme par exemple la technique Polynomial Texture Mappings (PTM) ou la décomposition en Harmoniques Hémisphériques (HSH). Ces approches sont très performantes pour décrire le comportement lumineux des surfaces Lambertiennes, mais la description du brillant et plus généralement des comportements plus complexes observés à l'endroit des anomalies locales est souvent trop peu conforme à leur perception réelle.

## Structuration du document

Le **chapitre 1** présente un état de l'art des différentes approches pour réaliser l'acquisition et la modélisation de l'aspect, et décrire au mieux le réel perçu. Comme le système visuel s'appuie sur des paramètres intrinsèques à la surface pour réaliser son évaluation de la qualité des surfaces, il remonte donc vraisemblablement jusqu'à la rugosité. Nous retrouvons la caractérisation des états de surfaces au moyen des indicateurs statistiques topographiques. Nous verrons ses principales limites dans le cadre de la maîtrise de l'aspect des surfaces industrielles, notamment lorsqu'on recherche des événements locaux (rayures, piquûres, stries, etc.). A cet effet, nous introduisons la notion de saillance particulièrement adaptée pour décrire la nature visuelle des anomalies d'aspect. Nous faisons un rappel des grandeurs photométriques et des différents types de réflexion pour comprendre de quel stimulus l'aspect tire son origine, ce qui nous amènera à présenter la BRDF de façon plus précise. Nous verrons ensuite en détail le principe de la méthode Reflectance Transformation Imaging à travers les spécifications d'acquisition et les modèles existants d'approximation. Nous montrons également comment obtenir le champ de normales à la surface par la résolution de l'équation classique de la stéréophotométrie à partir des mêmes données d'acquisition RTI. Nous nous intéresserons enfin à l'obtention de l'information en courbures utilisée dans ces travaux pour faciliter la corrélation entre l'apparence de la surface (reconstruction RTI) et la micro-géométrie de la surface.

Le **chapitre 2** décrit l'architecture du dispositif MeSurA et les développements logiciels pour la visualisation du rendu RTI [Pitard 13, Pitard 14a]. Par conséquent, ce chapitre comporte deux parties. Dans un premier temps, nous présentons les améliorations liées au dispositif afin de progresser dans la mesure des données d'acquisition et de réduire l'incertitude de mesure : maîtrise des sources d'éclairage, extension des points de vue, rapidité de l'acquisition. Ces développements permettent de proposer conjointement des spécifications de la machine d'inspection en terme de capacité et d'avancer sur une réelle métrologie de l'aspect. Dans un second temps, nous présentons les différents outils des interfaces graphiques développées dans le cadre de ces travaux qui ont pour but de faciliter la tâche des opérateurs et l'interprétation des résultats. L'objectif est d'automatiser au maximum le processus d'utilisation qui irait dans le sens d'une meilleure formalisation du processus de contrôle de la qualité d'aspect.

Le **chapitre 3** propose une nouvelle paramétrisation des surfaces de luminance basée sur le principe de la Décomposition Modale Discrète (DMD) [Pitard 15]. Cette approche présente l'avantage de décrire la répartition de la luminance à partir d'une base de fonctions géométriques plus variées, et conduit ainsi à une description plus fine, et donc plus réaliste en terme de perception, de la complexité des formes locales de réflexion lumineuse. Pour cela, nous proposons des indicateurs pertinents pour évaluer la qualité de reconstruction des approches RTI. L'analyse comparative a permis de valider les performances et l'intérêt de la DMD par rapport aux autres approximations existantes (PTM, HSH) utilisées dans leur développement classique.

Dans le **chapitre 4**, nous proposons nos avancées sur une nouvelle technique de mesure de similarité

de l'aspect des surfaces. Le but est de mettre en évidence les régions sur la surface qui ont des comportements lumineux similaires. Cette étape est généralement considérée comme une étape essentielle vers l'automatisation de l'inspection visuelle pour de nombreuses applications. La DMD va décomposer la réflexion lumineuse, connue de manière discrète, dans un espace de descripteurs sous la forme d'un vecteur d'amplitudes. Nous proposons un nouveau paramétrage mathématique transformant ces amplitudes modales en leurs invariants en rotation afin de considérer comme identique deux surfaces de luminance symétriques. Le paramétrage des invariants a été utilisé sur plusieurs échantillons d'application afin de présenter sa mise en œuvre pratique et ses avantages dans le cadre de mesure de similarité de l'aspect des surfaces. Nous proposons une chaîne de traitement pour localiser les régions les plus éloignées du comportement lumineux moyen de la surface par un calcul de distance adapté. La mise en évidence des écarts d'aspect permet d'appréhender la problématique liée à l'identification et à la caractérisation des anomalies d'aspect, et de proposer des attributs fiables pour lesquels des niveaux d'intensité peuvent être associés en lien avec leur criticité.

Le **chapitre 5** est consacré à l'étude des courbures à la surface [Pitard 14b, Pitard 14c] pour donner du sens à la mesure et permettre à terme de piloter les procédés de fabrication en conséquence. L'étude porte d'une part sur l'identification des anomalies d'aspect et d'autre part sur la signature du procédé de fabrication. Leurs expressions sur la surface se traduisent généralement par des motifs géométriques à l'échelle de la rugosité sauf cas des hétérogénéités de matière (propriétés du milieu). La réflectivité locale va varier avec le taux (vitesse) de variation des normales à la surface (courbures). Partant de cette constatation, le rayon de courbure des irrégularités de surface jouent un rôle prépondérant sur les variations de la réflexion spéculaire. Les courbures perçues ne bénéficient pas d'un important corpus de connaissances scientifiques dédiés à sa mesure comme attribut de l'aspect. Nous présentons un état de l'art des principaux indicateurs de courbure, appelés *courbures équivalentes*, calculés à partir des *courbures principales* (les courbures minimale et maximale rencontrées en faisant tourner le plan de coupe autour d'un point de la surface). Nous mettons l'accent dans ce chapitre sur un nouvel indicateur de courbure, appelé *courbure directionnelle*. Cet indicateur n'est pas basé sur l'intensité de courbures principales cependant il permet de conserver l'information de direction essentielle pour mettre en évidence des ruptures dans la continuité de forme et de réflectivité de la surface.

# Acquisition et modélisation de l'aspect des surfaces

## Sommaire

<b>1.1</b>	<b>Analyse de l'aspect des surfaces</b>	<b>6</b>
1.1.1	Etats de surface & Aspects de surface	6
1.1.2	Textures surfaciques	10
1.1.3	Anomalies d'aspect	10
1.1.4	La saillance	11
<b>1.2</b>	<b>Interactions de la lumière avec la surface</b>	<b>13</b>
1.2.1	La luminance	13
1.2.2	Réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion mixte	15
1.2.3	Fonction de répartition bi-directionnelle du coefficient de luminance (BRDF)	17
1.2.4	Mesure et modélisation du coefficient de luminance bi-directionnel	17
<b>1.3</b>	<b>Reflectance Transformation Imaging</b>	<b>19</b>
1.3.1	Spécification des données stéréo-photométriques RTI	20
1.3.2	Modèles RTI existants	21
1.3.3	Comment les méthodes RTI traitent la couleur ?	24
<b>1.4</b>	<b>Altitudes, pentes et courbures de la surface</b>	<b>25</b>
1.4.1	Relation entre la luminance et la normale à la surface	25
1.4.2	Estimation robuste de la normale dans le cas des surfaces réelles	28
1.4.3	Information en courbure	29
1.4.4	Applications de la mesure des courbures	31
<b>1.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>33</b>

## 1.1 Analyse de l'aspect des surfaces

L'analyse de la qualité d'aspect des surfaces est souvent réalisée au moyen d'un contrôle sensoriel humain (inspection visuo-tactile), sauf pour certaines applications spécifiques, dans les domaines de l'automobile ou de l'aéronautique par exemple, pour lesquels des systèmes automatisés ont pu être mis en œuvre. L'inspection visuelle consiste généralement à faire varier l'orientation du produit dans l'espace, afin de modifier l'angle d'incidence de la lumière sur les surfaces. Ce procédé d'exploration permet de réduire la variabilité des résultats lors de la détection des anomalies d'aspect. L'évaluation qui vise à définir l'intensité des anomalies, et la décision, qui vise à décider de la conformité des produits, sont aussi des étapes difficiles à maîtriser. La mise en œuvre de méthodes d'aide à la décision formalisées permettent cependant de rendre ce processus plus reproductible [Debrosse 10, Baudet 11]. A cette fin, Guerra [Guerra 09] et Baudet [Baudet 11] préconisent de décomposer le processus de métrologie sensorielle d'inspection des surfaces en trois étapes : l'exploration, l'évaluation et la décision. Nous reviendrons sur chacune de ses phases de l'inspection visuelle à travers les différents développements proposés dans ces travaux.

Selon les applications, l'analyse de l'aspect des surfaces peut être globale ou locale, la notion de localité prenant toute son importance avec la complexité des surfaces. Ce mode d'investigation, du global vers le détail, possède une similitude avec le système visuel humain qui n'utilise pas les mêmes neurones pour apprécier l'organisation générale d'une scène et traiter ses détails. Aussi, les techniques instrumentales peuvent être divisées en deux champs de mesure : la première globale va regrouper les méthodes permettant d'accéder à une cartographie étendue de la surface, la seconde, dite locale (ou ponctuelle), concerne les moyens de mesure ne donnant qu'une information sur un point de la surface. Par exemple, les capteurs mesurant l'altitude à chaque point de la surface sont dédiés à l'analyse des états de surface.

Lorsque notre œil accomode sur la surface de l'objet, le système visuel humain se crée une perception des caractéristiques texturales de la surface à partir desquelles il élabore son appréciation de la qualité du produit. L'appréciation de la rugosité peut intervenir de façon directe comme argument de vente en lien avec les propriétés esthétiques du produit, mais exerce également une influence sur le contrôle des propriétés fonctionnelles de la surface. Les liaisons entre les états de surface et les aspects de surface sont abordés dans la section suivante. Ce point de départ de nos recherches, axé sur les propriétés intrinsèques des surfaces qui donnent aux surfaces leur aspect, permet de mieux appréhender la nature des problématiques qui se situent à l'interface entre la perception visuelle de la surface et les propriétés topographiques et mécaniques de celle-ci.

### 1.1.1 Etats de surface & Aspects de surface

L'analyse et la mesure des surfaces industrielles ont pour objectif de discriminer les surfaces et de corréler à une fonctionnalité, à des échelles suffisamment fines. On cherche souvent à étudier le lien avec la fonction spécifiée et attendue des surfaces. Parmi les corrélations fonctionnelles possibles avec les textures surfaciques, on liste généralement :

- réflexion de la lumière (aspect ou transfert d'énergie),
- résistance à l'écoulement,
- échange de chaleur,
- réaction chimique,
- frottement,
- mouillabilité,
- conductivité,
- etc.

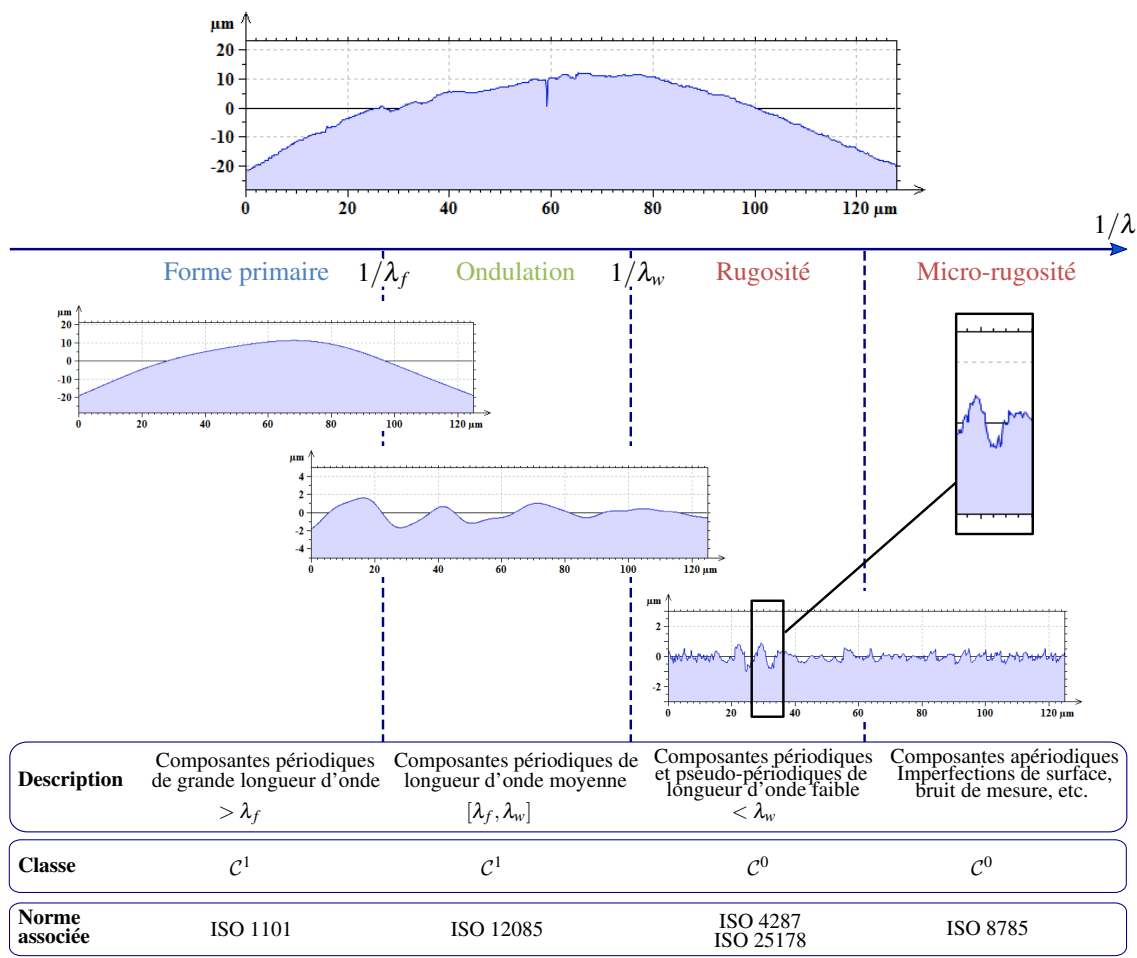


FIGURE 1.1 – Ordres de défauts superficiels

A ce titre, l'aspect peut être vue comme une fonction de la surface. Par ailleurs, dans la plupart des normes qui traitent des surfaces, l'examen visuel et tactile est souvent le premier cité. Quoique qualificatif, il représente souvent une synthèse des paramètres difficilement quantifiables par d'autres moyens : texture, teinte, aspects en lumières diverses, sensations mécaniques et thermiques. Cette relation est implicite, suggérant qu'un produit fonctionnel et fiable devrait aussi avoir un aspect de surface sans imperfections.

Facteur d'échelle

L'échelle de mesure requiert une attention particulière. De façon générale, la topographie d'une surface se compose de plusieurs échelles, depuis l'échelle macroscopique (la forme) considérée comme la pleine échelle, jusqu'aux échelles microscopiques appelées rugosité. Au niveau surfacique, les variations considérées par rapport à un idéal défini par le concepteur, aussi appelées écarts, peuvent être catégorisées selon 4 ordres de défauts synthétisés dans la figure 1.1. Lors de l'analyse des surfaces à partir de l'information en altitude, une étape importante et préliminaire consiste donc à séparer les composantes de forme, d'ondulation, de rugosité voire de micro-rugosité. On peut chercher par exemple à identifier dans quel ordre de défaut les anomalies d'aspect se situent afin de les isoler des autres composantes de la surface.

Les trois techniques de décomposition surfacique actuellement disponibles sont le filtrage Gaussien (GF) (aussi appelé la transformée de Fourier), la transformée en ondelettes discrètes (DWT) et une technique plus récente appelée Décomposition Modale Discrète (DMD). Le Goïc [Le Goïc 16] a mené une étude sur l'utilisation de ces techniques sur une grande variété de mesures de surfaces extraites de différents

Caractéristique topographique	Ondelettes	Modal	Gaussien
Aptitude à détecter les propriétés multi-échelles	++	+++	+++
Structure périodique ou pseudo-périodique (outil d'usinage, ...)	-	-	++
Structure morphologique complexe	-	++	++
Signature topographique dans le signal complexe (piqûres, ...)	+++	++	-
Aptitude à analyser les processus anisotropes (rainures, ...)	++	+	-

TABLE 1.1 – Caractéristiques des méthodes multi-échelles [Le Goïc 16]

processus tribologiques. Une analyse statistique, à partir d'indicateurs de pertinence, a été réalisée dans le but de comparer ces trois méthodes, et de proposer des critères objectifs sur leur choix lors de la mise en œuvre d'une analyse fonctionnelle. Les résultats de cette étude sont synthétisés dans le tableau 1.1. Une autre méthode multi-échelle développée par Brown [Brown 94, Brown 96], appelée *area-scale*, calcule les corrélations entre certains paramètres et la fonction souhaitée, en faisant varier la taille des éléments du maillage utilisée sur la surface. Cette méthode permet notamment de déterminer l'échelle d'analyse la plus pertinente pour discriminer les surfaces.

Dans un contexte industriel, ces différentes méthodes sont généralement considérées comme inadaptées lorsqu'il s'agit d'inspection (recherche d'anomalies locales) en raison des contraintes techniques liées au temps de mesure d'une pièce complète, et du traitement nécessaire à une telle quantité de données. Cependant, les progrès technologiques et l'amélioration continue des méthodologies tendent à faciliter le déploiement de ces approches en dehors des laboratoires de mesures physiques. Par exemple, les moyens d'acquisition optique sont maintenant presque omniprésents car ils permettent de combiner les approches et d'accéder à une information topographique toujours plus fine dans des temps plus courts. À partir des mesures rugosimétriques, des indicateurs statistiques normalisés dédiés à la caractérisation de la texture de surface sont généralement calculés. Une brève discussion sur ces indicateurs statistiques d'états de surface est donnée dans la section suivante. Nous identifions les limites importantes de ces paramètres de rugosité dans la perspective de mieux maîtriser l'aspect des surfaces.

### Indicateurs statistiques d'états de surface

Les différents indicateurs d'états de surface 3D normalisés, ISO 25178 [ISO-25178-2 12], permettent de piloter les différents process de finition de surface en conséquence. Ces indicateurs basés pour la plupart sur une analyse statistique simple de la hauteur des pics et des vallées sont très largement utilisés pour la caractérisation morphologique des textures surfaciques. Cependant, de nombreux phénomènes et interactions des surfaces ne sont pas directement liés à l'information des altitudes et à ces indicateurs généralement calculés lorsqu'on analyse la rugosité. La pratique montre que les paramètres statistiques de rugosité ne semblent pas suffire, ou sont peu adaptés, pour décrire la complexité des diverses interactions surface/lumière qui affectent l'apparence visuelle des surfaces, et dont les causes et effets varient souvent avec l'échelle d'observation.

Par ailleurs, les paramètres surfaciques 3D normalisés sont plutôt « intégrales » (donc ont un effet moyennant), d'où le fait de leur inefficacité à traduire, par exemple, les anomalies locales qui apparaissent en queue des distributions des hauteurs. En l'occurrence, cela est dû à la nature et à la proportion des anomalies (rares sur la surface), mais qui influent très fortement, en raison de leur caractère *saillant* (section 1.1.4), dans notre perception de la qualité des surfaces. On retrouve le lien entre les caractéristiques d'état de surface et la fonction d'aspect dans la littérature sur :

- une corrélation entre le brillant et la rugosité

→ Les travaux de Béland et Bennet [Béland 00] sur l'étude des principaux facteurs de micro-rugosité



qui affectent l'apparence des surfaces de papiers imprimés dans le but de corrélérer ces grandeurs à une mesure de brillance du papier.

- L'étude de Briones [Briones 06] sur l'aspect de différents échantillons de chocolat de composition identique. Les aspects en terme de brillant et de couleur varient en fonction du grain de papier de moulage utilisé. De bonnes corrélations ont été trouvées entre les paramètres de rugosité ( $Asfc$ , *Area-scale fractal complexity* et  $ARa$ , *Average roughness*) et les grandeurs associées aux propriétés optiques de la surface ( $GU$ , *Gloss Units* et  $WI$ , *Whiteness Index*).
- Les travaux de doctorat de Qi [Qi 12] sur des paramètres de rugosité de surfaces simulées par ordinateur, qui influent sur la brillance perçue. L'étude psychophysique a porté sur la façon dont la brillance perçue varie avec deux paramètres de rugosité qui interviennent dans leur modèle de simulation, associés respectivement à la meso- et micro-échelle [Qi 15], des surfaces-stimuli.
- une corrélation entre la couleur et l'état de surface
  - Elias et Simonot [Simonot 02, Elias 05] montrent que l'état de surface modélisé comme un ratio  $h/l$  où  $h$  est la hauteur du profil et  $l$  la longueur de corrélation, a une influence significative dans la perception de la couleur d'une surface.
- une corrélation entre la rugosité *réelle* et la rugosité perçue
  - La dimension fractale  $S_{fd}$  (eq. 1.1) est définie pour corrélérer avec notre perception visuelle de la rugosité. Plus la surface est perçue comme étant rugueuse, plus la valeur du paramètre de dimension fractale est grande.

$$S_{fd} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ 2 - \frac{d(\log(S_{vs}(s)))}{d(\log_e(s))} \right] \quad (1.1)$$

Un calcul des variations est utilisé pour définir  $S_{fd}$ , qui est équivalent à la dimension de Minkowski-Bouligand. Le graphe volume-échelle  $S_{vs}(s)$  (figure 1.2a) représente le logarithme des volumes compris entre les enveloppes morphologiques obtenues par fermeture et ouverture de la surface à l'aide d'un élément structurant plat, en fonction du logarithme de la taille  $s$  de cet élément structurant.

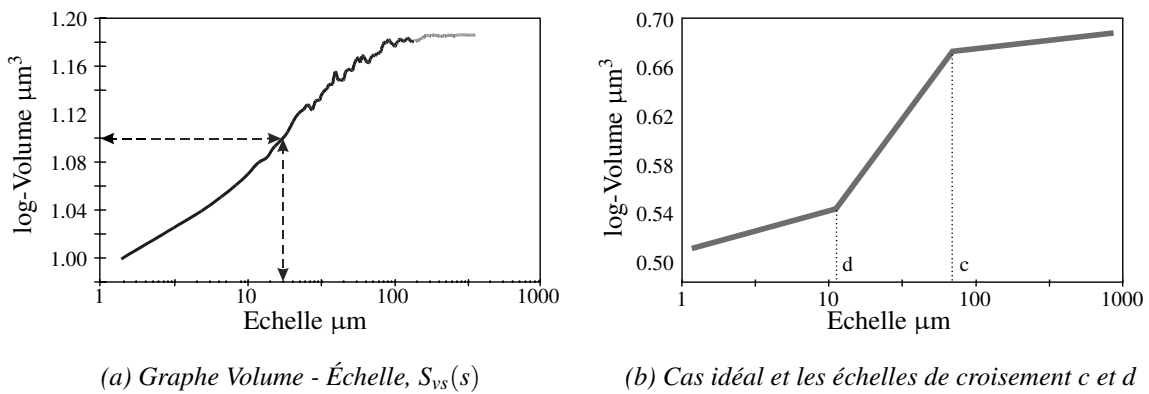


FIGURE 1.2 – Graphes Volume - Echelle

Les surfaces ne sont pas des surfaces fractales, car ils ne contiennent pas le même type de structure à toutes les échelles. Elles peuvent cependant afficher un comportement de type fractal sur une gamme d'échelle. Un autre type de tracé qui donne des informations similaires est appelé l'analyse *Area-Scale* que nous avons présenté précédemment, basé sur la triangulation plutôt que sur les enveloppes supérieures et inférieures de la surface. L'identification des *échelles de croisement*



(figure 1.2b) est important car elles indiquent un changement dans le mécanisme qui domine dans le processus de création de la surface.

Cette liste ne peut pas être exhaustive. Cependant, les études de l'aspect basées sur des paramètres statistiques de rugosité sont rares comme le montre une analyse des bibliographies présentes dans les publications citées précédemment. En synthèse, les méthodologies mises en œuvre confirment l'importance de l'échelle de mesure pour étudier les effets de la rugosité sur la façon dont la lumière est réfléchie sur les surfaces. Ces travaux montrent aussi la difficulté de corrélérer de manière générale des indicateurs extraits de l'information des altitudes à la perception visuelle des caractéristiques recherchées de la fonction d'aspect (couleur, brillance, etc.), car de nombreuses surfaces d'aspects différents peuvent conduire à des paramètres rugosimétriques statistiques identiques. Le lien avec l'aspect global est cependant moins problématique que la corrélation avec des événements locaux sur la surface tels que des défauts d'aspect.

### 1.1.2 Textures surfaciques

Les méthodes d'analyse de texture existantes sont, en général, incapables de résoudre tout type d'évaluation qualitative automatisée, comptant plutôt sur l'interprétation subjective et manuelle des contrôleurs qualité. L'appréciation visuelle de l'aspect des surfaces est faite par comparaison à des références en termes de similarité ou de dissimilarité. La possibilité d'automatiser la classification des textures en évaluant, par exemple, la régularité de la texture, qu'elle soit fortement, faiblement ou aléatoirement ordonnée, est considérée comme une étape essentielle vers la réalisation de l'analyse automatisée de la texture de surface à travers de nombreuses applications. Ces applications visent souvent à séparer différentes zones qui possèdent les mêmes propriétés, ou à séparer différentes *composantes périodiques et non-périodiques* de la surface qui contiennent les imperfections de la surface.

Le rapprochement entre les communautés du traitement d'image et de la mécanique a permis d'apporter des solutions aux applications industrielles en ingénierie des surfaces sur cette problématique liée à la texturation des surfaces. Ainsi, des méthodes issues de l'analyse d'image ont été efficacement transposées à l'étude des états de surface, par exemple les méthodes de segmentation intégrées à l'ISO 25178 comme méthode de caractérisation topologique des motifs surfaciques. Ce va-et-vient entre les domaines du traitement d'image et de l'ingénierie des surfaces a permis d'enrichir les méthodes de caractérisation métrologiques d'états de surface, à l'instar des nombreux outils d'analyse d'image implémentés sur des logiciels spécialisés comme Mountains® ou Gwyddion (libre de droit).

Pour répondre à cette problématique liée à la caractérisation des textures, nous apportons des solutions pour garantir la compatibilité des outils de mesure de similarité d'aspect de surface vis-à-vis de l'isotropie des surfaces dans le chapitre 4. Et, nous proposons une méthode basée sur l'information en courbures pour séparer efficacement les composantes périodiques et non-périodiques de la surface dans la chapitre 5. Nous montrons que ces méthodes sont particulièrement adaptées à la recherche et à la caractérisation des anomalies d'aspect.

### 1.1.3 Anomalies d'aspect

Les anomalies d'aspect jouent un rôle essentiel dans l'appréciation de la qualité d'une surface, car elles traduisent un écart par rapport à l'intention du fabricant. De ce fait, la maîtrise de l'aspect des surfaces passera toujours par l'identification et la caractérisation des anomalies visibles sur la surface afin de décider de la conformité des produits. En terme de vocabulaire, un **défaut** [ISO-9000 01] qualifie une non-qualité du produit, qui sera considéré comme non acceptable par rapport à une exigence relative à une utilisation prévue ou spécifiée. Le terme **anomalie** ne porte pas un jugement prématuré sur la criticité qui dépend de l'application ou de la fonction de la surface considérée. Une anomalie peut donc être acceptable ou non

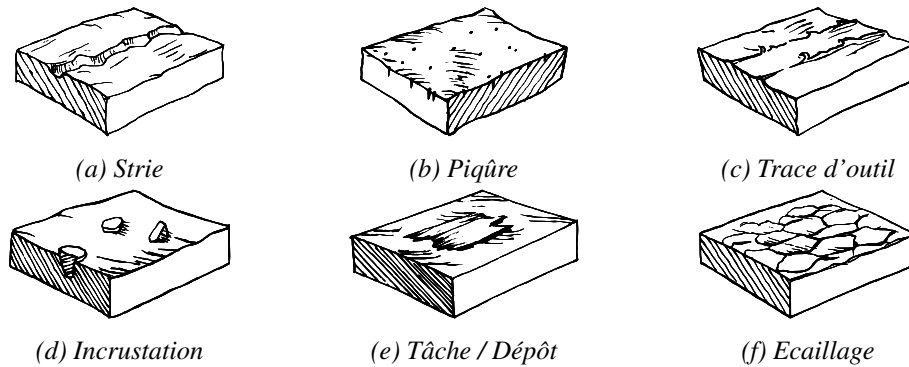


FIGURE 1.3 – Exemples d'imperfection de surface définis par la norme ISO 8785

acceptable. Nous distinguons par ailleurs deux types d'anomalies, d'une part les **anomalies locales** de type coups, impacts, pollutions locales et marques (figure 1.3), et d'autre part les **anomalies globales** qui se traduisent par une hétérogénéité entre différentes surfaces, ou éventuellement entre différentes zones d'une même surface. Si ces événements locaux peuvent être plus ou moins apparents sur la surface, les différentes expressions d'une anomalie d'aspect sont généralement de nature à se distinguer du reste de la surface. On peut parler d'éléments de saillance car elles s'imposent à l'attention, jusqu'à parfois concentrer les processus cognitifs sur ces seuls éléments. Après cette section clarifiant la notion de saillance, nous décrirons notre méthodologie positionnant la saillance par rapport aux caractéristiques de l'interaction de la lumière avec la surface qui sont directement liées aux propriétés du stimulus.

#### 1.1.4 La saillance

La recherche d'anomalies d'aspect peut être vue comme une recherche d'observations atypiques sur les surfaces, et elle est liée plus généralement à la notion de **saillance** visuelle (appelée *saliency* ou *saliency* en anglais).

La saillance est un concept large dans la mesure où il est un moyen d'identifier le contenu informatif de tout type de données qui guide notre attention visuelle. La saillance d'un élément - qui peut être un objet, une personne, un pixel, etc - désigne l'état ou la qualité par laquelle cet élément se démarque de son voisinage. Itti et Baldi [Itti 05, Itti 09, Baldi 10] proposent une définition de la saillance en terme de surprise Bayésienne (i.e. le cerveau comparé à une machine probabiliste), et suggèrent que l'attention est attirée vers les signaux visuellement surprenant. A ce niveau, on distingue :

- la « saillance attentionnelle » ; elle est involontaire car principalement liée aux propriétés du système visuel humain qui procède selon une sélection ascendante (*bottom-up*) parmi les données sensorielles,
- la « saillance de recherche » ; elle est le résultat d'une recherche volontaire, conditionnée par des facteurs cognitifs différents qui dépendent de la tâche en cours, des connaissances, des attentes, des objectifs attendus, etc. On parle de biais descendants (*top-down*).

La somme des données sensorielles est en général trop grande pour être complètement traitée en détail et les actions possibles en un seul et même instant sont limitées ; le cerveau doit donc prioriser. Le problème est identique pour les systèmes d'inspection par vision qui peuvent traiter avec des milliers, parfois des millions de pixels dans un temps d'analyse imparti très restreint (réglage, acquisition, traitement et synthèse de l'information utile) afin que le contrôle par vision artificielle ne devienne pas un goulot d'étranglement au niveau du processus industriel. Parmi les théories de l'attention visuelle, on peut citer les travaux de Itti [Itti 98, Itti 00] sur le modèle FIT (Feature Integration Theory) qui permet de calculer la saillance visuelle à partir d'une image. Dans son développement initial, la saillance est calculée à partir de trois caractéristiques

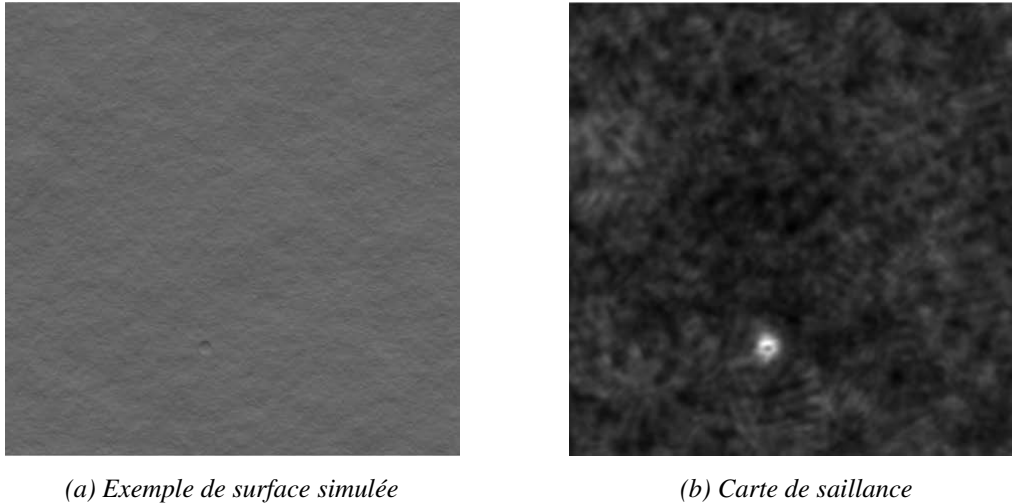


FIGURE 1.4 – Cartes de saillance obtenues sur des surfaces rugueuses simulées, selon [Clarke 09]

de l'image : le contraste de luminance, l'orientation et la couleur - et où chaque élément est calculé à plusieurs niveaux d'échelle en construisant une pyramide de Gaussiennes [Burt 83]. Le modèle a été ensuite étendu au calcul de la saillance dans une scène dynamique en intégrant des estimateurs de mouvement [Itti 04]. De nombreux travaux inspirés du modèle FIT ont été développées ces dernières années pour des applications différentes sur des maillages 3D [Charton 14], sur des images multi-spectrales [Le Moan 13], etc.

Parmi les nombreuses applications des modèles existants de saillance, on peut citer les travaux de doctorat de Clarke [Clarke 10] sur la problématique de détection de défauts sur des surfaces texturées. Des surfaces synthétiques créées à partir d'algorithmes de rendu sont destinées à générer les stimuli d'une série d'expériences psychophysiques menées sur des observateurs humains en mesurant les mouvements de leurs yeux au moyen d'un oculomètre, puis à comparer les résultats de cette étude aux performances des modèles de saillance existants [Clarke 09]. Clarke montre que les primitives utilisées dans le modèle de saillance de Itti et Koch ne sont pas suffisantes pour fournir une simulation robuste de la recherche visuelle dans le cas de la recherche d'une anomalie (type indent) sur les surfaces rugueuses simulées, en mettant notamment en évidence les limites du modèle confrontés aux changements de rugosité de la surface ou d'orientation de l'anomalie. L'algorithme utilisé est une implémentation du modèle de Itti et Koch<sup>1</sup> développée sur Matlab par Walther and Koch [Walther 06] avec des changements sur les paramètres qui permettent de spécifier à quelles résolutions/échelles travailler de la pyramide de Gaussiennes. Clarke s'est limité à l'application sur des surfaces simulées qui manquent de complexité visuelle vis-à-vis des surfaces réelles. De plus, le choix arbitraire d'une direction d'éclairage fixe et d'une réflectance particulière (diffuse) des surfaces simulées réduit la complexité des interactions de la lumière avec la surface à traiter.

La maîtrise de la perception des produits nécessite de connaître les propriétés des surfaces des produits et la façon dont celles-ci interagissent avec leur environnement lumineux. Une approche consiste donc à voir l'aspect comme une fonction particulière des surfaces, directement liée à l'interaction de la lumière avec une surface. L'objet de la suite de ce chapitre et plus globalement de ces travaux de recherche est de présenter les principaux modèles et grandeurs relatives aux interactions de lumière/surface, et de proposer des nouvelles méthodes pour caractériser l'aspect d'une surface à partir des attributs de la réflexion lumineuse d'une part et de la géométrie de la surface d'autre part. Pour lier les deux approches « lumière » et « géométrique », nous

1. Saliency toolbox : <http://www.saliencytoolbox.net>

avons recours dans ces travaux à des données stéréophotométriques de la surface qui permettent d'effectuer simultanément une mesure simplifiée et réduite du coefficient de luminance bi-directionnel (section 1.3) et une estimation du champ de normales à la surface (section 1.4.1).

## 1.2 Interactions de la lumière avec la surface

Une onde lumineuse est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde  $\lambda$  se situe dans le spectre visible. On distingue deux domaines de mesures des rayonnements électromagnétiques : la radiométrie et la photométrie. La radiométrie s'intéresse à la quantification des rayonnements sur tout le spectre de longueur d'onde. La photométrie désigne l'ensemble des techniques dédiées à la mesure des rayonnements visibles par l'oeil humain. L'objectif de la photométrie est de mesurer des grandeurs relatives aux rayonnements, évaluées selon l'impression visuelle qu'elles produisent sur un observateur moyen de référence représenté par la *courbe d'efficacité lumineuse spectrale relative*  $V(\lambda)$  [CIE 04]. Cette courbe a été définie initialement en 1924 par la Commission Internationale d'Eclairage (CIE) après une série de mesures sur un grand nombre d'individus, et représente la sensibilité lumineuse de l'oeil à différentes longueurs d'onde du domaine du visible. Dans la pratique, le lien entre les unités de photométrie et de radiométrie est donné par la définition de la candela (cd). Cette unité de base du SI rattache l'intensité lumineuse, grandeur liée la sensation visuelle, à une grandeur physique, l'intensité énergétique.

Toutes les grandeurs photométriques dérivées tiennent donc compte à la fois des caractéristiques purement physiques du flux énergétique qui stimule le système visuel humain, et de la sensibilité de ce système visuel. Nous abordons dans cette première partie les principales grandeurs de la photométrie (figure 1.5) à travers la définition de la « luminance » qui est une grandeur fondamentale lorsqu'on souhaite étudier l'aspect visuel des surfaces.

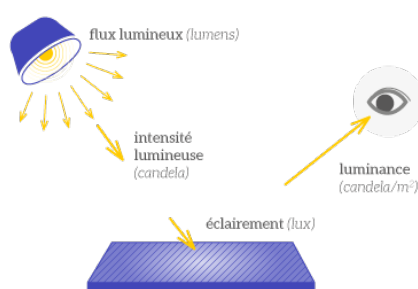
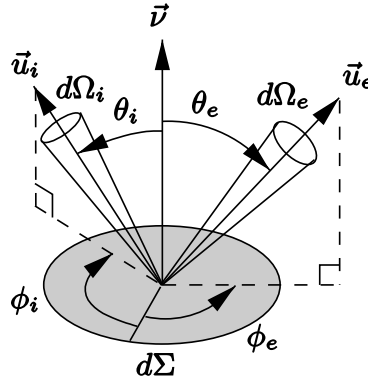


FIGURE 1.5 – Grandeurs en photométrie

### 1.2.1 La luminance

Partout où nous regardons, nous voyons la luminance (*radiance* en anglais). Nous ne voyons pas l'intensité lumineuse ou l'éclairement ; nous voyons la luminance. C'est indéniablement la quantité la plus importante, et le concept fondamental dans l'étude de la fonction d'aspect des surfaces. Pour mieux comprendre la luminance, commençons par visualiser un faisceau de lumière, émis par une source lumineuse

FIGURE 1.6 – Définition des angles  $\theta_i, \phi_i, \theta_e$  et  $\phi_e$ , selon Durou [Durou 07]

ponctuelle, dont les rayons sont rectilignes et parallèles. L'*intensité lumineuse* de cette source est exprimée en candela (cd). Si nous prenons une section de ce faisceau en tout point de sa longueur, nous pouvons mesurer la quantité de lumens (c'est-à-dire le nombre de photons par seconde) par unité de surface. En terme photométrique, il s'agit du *flux lumineux*  $\Phi_e$  par unité de surface, ou encore *la densité de flux lumineux*, de ce faisceau. Les rayons lumineux étant parallèles, la densité du flux lumineux est la même tout le long du faisceau. Maintenant, si nous regardons ce qui se passe lorsque le faisceau éclaire une surface réelle comme schématisée sur la figure 1.6, le flux lumineux reçu par l'élément de surface élémentaire  $d\Sigma$ , de vecteur normal unitaire  $\vec{v}$ , est déterminé par le cosinus de l'angle  $\theta_i$ . En théorie, lorsque l'angle d'incidence devient plus grand (ie. le flux est plus rasant), l'éclairement  $E$  (lumens par unité de surface) de la surface diminue.

$$E = \frac{d\Phi_i}{d\Sigma} \quad [\text{lm.m}^{-2}] \text{ ou } [\text{lx}] \quad (1.2)$$

La notion d'*éclairement* va de paire avec celle d'*exitance* car elles mesurent des quantités analogues : la première est la densité de flux lumineux *reçu* par l'élément de surface, et l'autre la densité de flux lumineux *émis* par l'élément de surface. L'exitance notée  $M$  vaut donc  $M = d\Phi_e/d\Sigma$ . L'exitance ne délivre en revanche aucune information sur les propriétés angulaires du rayonnement réfléchi par la surface. Dès lors, on utilisera la luminance, qui peut être vue comme l'énergie portée par un rayon lumineux réfléchi par la surface. Elle quantifie la fraction du faisceau lumineux qui sera captée par un élément réceptif d'un détecteur (œil ou capteur). La luminance  $L$  est la densité du flux lumineux  $d^2\Phi_e$  par unité de surface apparente  $d\sigma_e$  dans la direction d'intérêt  $\vec{u}_e$  et par unité d'angle solide  $d\Omega_e$  du faisceau lumineux, défini mathématiquement par :

$$L(\vec{u}_e) = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega_e d\sigma_e} \quad [\text{cd.m}^{-2}] \quad (1.3)$$

avec  $d\sigma_e = d\Sigma \cos \theta_e$

On peut montrer que la luminance est constante tout le long de la direction de propagation d'un rayon lumineux. Autrement dit, nous percevons la luminance comme étant constante indépendamment de la distance entre l'œil et la surface éclairée. Par ailleurs, les lois d'additivité arithmétiques s'appliquent à la luminance. C'est à dire que deux rayonnements se produisant à deux longueurs d'onde différentes, et produisant la même sensation lumineuse, produisent une sensation double si ils sont appliqués ensemble. Par exemple, deux rayonnements, l'un de couleur jaune et l'autre de couleur bleue, ayant la même luminance, devraient, s'ils sont appliqués simultanément, produire une sensation de couleur sensiblement blanche ayant une luminance double. Nous verrons dans la section 1.3.1 que la luminance se mesure directement sur une photographie.

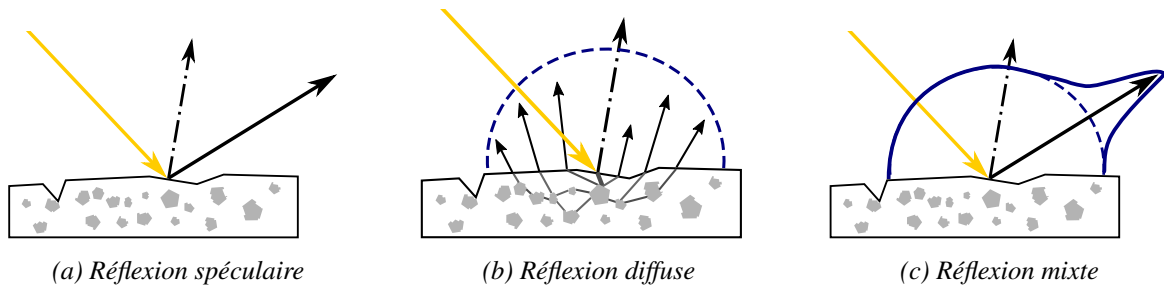


FIGURE 1.7 – Type de réflexion

### 1.2.2 Réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion mixte

On distingue généralement deux types de réflexion : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. Elles décrivent comment la luminance réfléchie par une surface est distribuée angulairement. Ces deux types de réflexion correspondent à des phénomènes physiques théoriques qui n'existent pas seuls en réalité. Pour les surfaces réelles, on parle de réflexion mixte.

- (i) La **réflexion spéculaire** (figure 1.7a) concerne la fraction de lumière incidente qui est réfléchie à la surface en accord avec les lois de Snell-Descartes et de Fresnel. La lumière ne pénètre pas le milieu, elle est réfléchie dans une direction privilégiée qui correspond à la direction spéculaire. La réflexion spéculaire présente donc la même couleur que celle de la source d'éclairage.
- (ii) La **réflexion diffuse** (figure 1.7b) aussi appelée *réflexion de volume*, concerne la fraction de lumière incidente qui ressort du matériau après avoir pénétré dans le milieu. Il s'agit d'un terme global, qui exprime le résultat d'un grand nombre d'interaction entre la lumière transmise et les hétérogénéités du milieu considéré. On la définit généralement par une indicatrice de luminance (en pointillés) qui représente le rayonnement sortant dans toutes les directions. Visuellement, la réflexion diffuse est à l'origine de la couleur de la surface observée. Une surface est dite parfaitement diffusante si la totalité du rayonnement incident est réfléchi avec une luminance indépendante de la direction d'observation.
- (iii) La **réflexion mixte** (figure 1.7c) caractérise la réflexion des surfaces réelles, elle correspond à une combinaison des deux composantes (réflexion spéculaire + réflexion diffuse).

Ces composantes sont généralement représentées par des formes lisses. Le paramétrage peut être affiné pour approcher la réalité physique des mesures. La figure 1.8 montre une autre décomposition possible de la réflexion lumineuse et les attributs de l'aspect généralement associés à ces différentes composantes. Le scintillement est utilisé par exemple pour caractériser les peintures à effet. La caractérisation du pic spéculaire permet de discriminer les brillants. La forme du lobe spéculaire dépend essentiellement de la texture rugosimétrique de la surface.

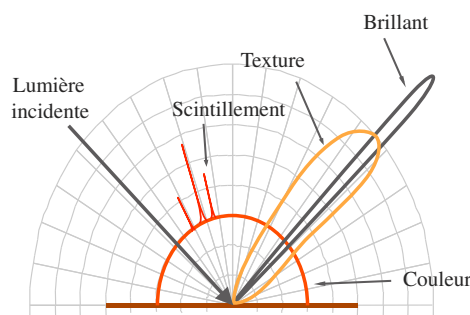


FIGURE 1.8 – Relation entre les attributs de l'aspect et les composantes de la réflexion, selon [Obein 14]



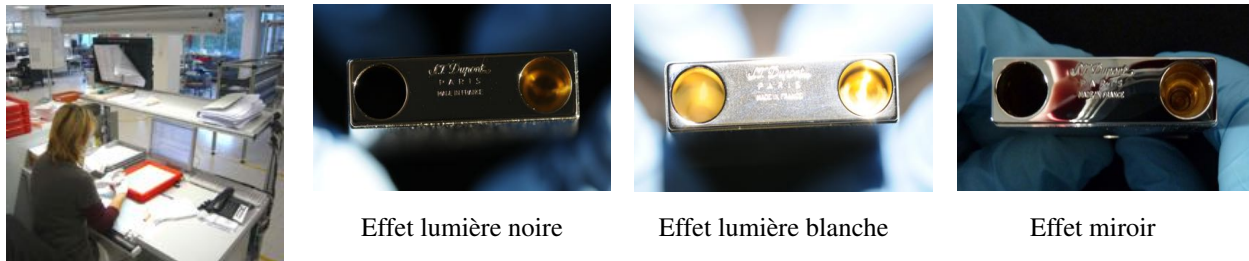


FIGURE 1.9 – Les 3 effets lumière recherchés par le contrôleur qualité lors de l’inspection visuelle des surfaces

Selon le type de réflexion que l’on souhaite exploiter afin de mettre en évidence certaines parties à inspecter, différentes configurations d’éclairage et d’observation peuvent être utilisées. On parle de **scène d’observation**. Lors de l’analyse sensorielle, les contrôleurs recherchent des configurations spéciales qui les conduisent à parcourir une large gamme de scène d’observation, et facilite ainsi la détection des anomalies d’aspect. Ces configurations particulières appelées effet lumière noire, effet lumière blanche et effet miroir, sont illustrées sur la figure 1.9. Sur la base de ces effets lumière, il est possible de recenser un grand nombre de systèmes optiques actuellement commercialisés pour répondre à la problématique de détection des anomalies d’aspect, et leur caractérisation, telles que les techniques connues sous les désignations *Dark-Field*, *Bright-Field*, ou encore du système *D-Sight*. La technique **Dark-Field** consiste à éclairer la surface par une source directionnelle avec un angle rasant, la technique **Bright-Field** utilise un capteur orienté selon la direction de la lumière réfléchiée spéculairement, et la technique **D-Sight** relie quant à elle les variations de courbures de la surface aux variations lumineuses au moyen d’un écran rétro-réfléchissant. Le principe du système D-Sight [Pastorius 90] est parmi les plus répandus dans l’industrie automobile [Andersson 09], mais aussi pour la détection de défauts sur les fuselages d’avion.

Aluze [Aluze 98] et Delcroix [Delcroix 00] dans leurs travaux respectifs de doctorat sur l’étude et la réalisation d’un dispositif de contrôle d’aspect par vision de produits cosmétiques, identifient très clairement la problématique qui se pose aux concepteurs de systèmes pour la vision et l’imagerie :

*« L’obtention d’un éclairage adapté reste très empirique : différents éclairages sont testés avant de choisir celui qui convient le mieux à l’application. B.G. Batchelor, dans son livre Automated Visual Inspection [Parmar 11] décrit 63 techniques d’éclairage et de prises de vue pour différents types d’application. Ces techniques sont couramment utilisées sans justifications théoriques. Elles relèvent donc plus d’un savoir-faire que d’une démarche scientifique. »*

Le choix des scènes d’observation est une problématique qui concerne les systèmes de vision indifféremment de leur utilisation (applications de mesures dimensionnelles, de contrôle d’aspect, des mesures de déplacements, de déformations, des applications de contrôle non destructif, etc.). Si l’éclairage est adéquat, il permet de réduire la complexité de traitement sur l’image pour le contrôle. Or, l’éclairage optimal dépend fortement des défauts à détecter, de la géométrie et de la nature des surfaces à contrôler. Chaque application nécessite donc un éclairage particulier et adapté. Par exemple, les surfaces qui se comportent comme des miroirs sont très difficiles à éclairer. Il n’est pas facile de réaliser de bonnes prises de vue de ces surfaces si l’on ne prend pas de précautions, tout l’environnement se réfléchit sur la surface. Dans d’autres cas, l’effet miroir peut être avantageux car cette configuration d’éclairage et d’observation peut permettre d’accentuer un défaut de planéité [Sun 06, Legay 05, Le Port 11]. Nous pouvons également lister d’autres méthodes physiques compatibles avec la détection d’anomalies d’aspect (la projection de franges, l’interférométrie en lumière blanche ou la réflexion de lumière structurée).

Ces approches basées sur des scènes d’observation particulières sont très dépendantes d’un changement de géométrie de pièce ou de l’apparition de nouvelles anomalies. La proposition faite dans ces travaux

est d'aller vers un dispositif ouvert en terme de recherche, permettant d'envisager le contrôle de tout type de pièce. En reconstituant l'ensemble des interactions de la lumière avec la surface, nous serons alors en possession de paramètres physiques permettant de discriminer les surfaces entre elles. Un certain nombre d'angles sont nécessaires pour réaliser une mesure réelle de ce type de grandeur que nous allons présenter dans la section suivante.

### 1.2.3 Fonction de répartition bi-directionnelle du coefficient de luminance (BRDF)

La *fonction de répartition bi-directionnelle du coefficient de luminance*<sup>2</sup> (plus connue sous son acronyme anglophone BRDF, pour *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) est la description analytique la plus fine de comment une onde lumineuse est réfléchie sur la surface. La définition radiométrique initiale fut introduite par Nicodemus [Nicodemus 65, Nicodemus 77]. Elle est définie comme le rapport de la luminance sortante  $L(\vec{u}_e)$  par l'éclairement  $E$ , pour une longueur d'onde donnée, et ne dépend donc que des directions  $\vec{u}_i$  et  $\vec{u}_e$ , c'est-à-dire des quatre angles  $\theta_i, \phi_i, \theta_e$  et  $\phi_e$ . On note la BRDF,  $f$  :

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e) = \frac{dL(\vec{u}_e)}{dE} \quad [\text{sr}^{-1}] \quad (1.4)$$

Il convient de distinguer la notion de *facteurs* et de *coefficients*. Les facteurs qualifient des termes sans dimension et les coefficients désignent des grandeurs avec dimension. Ainsi, il ne faut pas confondre le **coefficient de luminance** (*radiance coefficient en anglais*) et le **facteur de réflexion** (appelé également l'**albédo** ou la **réflectance**). Le terme anglais *reflectance* dans le terme BRDF est improprement utilisé, en effet, il s'agit bien du coefficient de luminance (grandeur avec dimension) qui est exprimé dans l'équation de la BRDF. Nous privilégions donc la traduction française préconisée par le LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais) à sa traduction littérale qui porte aisément à confusion. A partir de la BRDF, nous pouvons déduire la **réflectance** d'une surface qui est définie comme le rapport du flux lumineux réémis dans toutes les directions sur le flux lumineux incident dans une direction donnée  $\vec{u}_i$ , elle ne dépend donc que de  $\theta_i$  et  $\phi_i$  :

$$\rho(\theta_i, \phi_i) = \frac{d^2\Phi_e}{d^2\Phi_i} \quad (1.5)$$

Un cas particulier est celui des surfaces Lambertiennes ou dites parfaitement diffusantes. Pour ces surfaces, la luminance est indépendante de la direction d'émission, c'est-à-dire de  $\theta_e$  et  $\phi_e$ . Cette propriété se traduit par la relation de proportionnalité suivante entre le coefficient de luminance et la réflectance :

$$\rho_{\text{lamb}}(\theta_i, \phi_i) = \pi \times f_{\text{lamb}}(\theta_i, \phi_i) \quad (1.6)$$

Sous l'hypothèse que la réflectance de la surface est indépendante des angles  $\theta_i$  et  $\phi_i$ , il en vient une relation de proportionnalité entre la luminance et l'existance :

$$M_{\text{lamb}} = \pi \times L_{\text{lamb}} \quad (1.7)$$

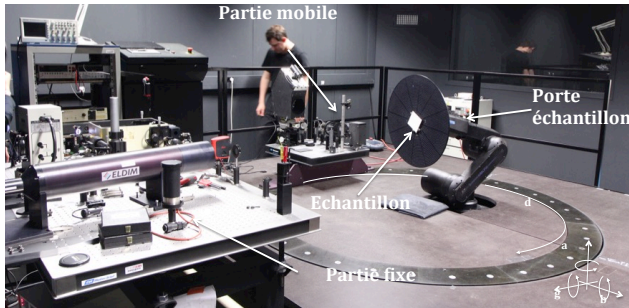
L'hypothèse Lambertienne est très largement utilisée dans les techniques stéréophotométriques car elle permet d'estimer très simplement la normale en chaque point de la surface lorsque les directions d'éclairage sont connues. Nous présentons ces techniques, et la relation qui lie une grandeur photométrique (la luminance) à une caractéristique géométrique de la surface (la normale) dans la section 1.4.1.

### 1.2.4 Mesure et modélisation du coefficient de luminance bi-directionnel

La coefficient de luminance bi-directionnel décrit angulairement comment est réémise la lumière sur une surface ou sur un élément de surface. Il est possible d'estimer localement cette information à partir de

2. Vocabulaire international de l'éclairage défini par la CIE : <http://eiv.cie.co.at/term/1013>

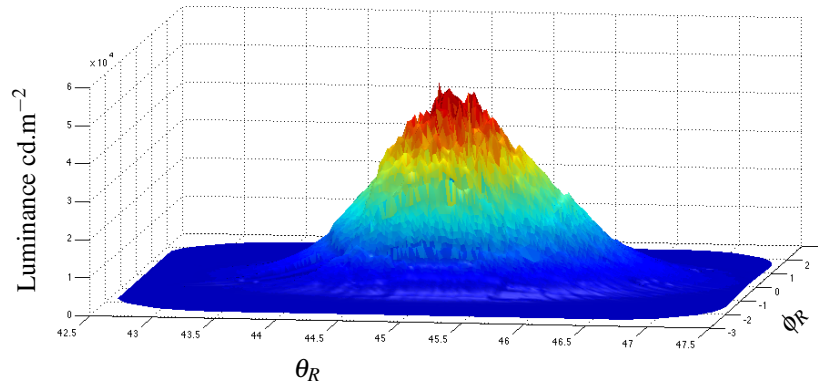




(a) Goniospectrophotomètre « Condor »



(b) Echantillon de brillant mesuré

(c) Mesures des luminances (1,4M de valeurs) en fonction des angles d'observation  $\theta_R$  et  $\phi_R$ FIGURE 1.10 – Mesure complète du pic spéculaire avec une résolution angulaire de  $0.004^\circ$  [Obein 14]

trois approches :

**a) Mesures goniospectrophotométriques**, i.e. une mesure complète du coefficient de luminance. Un échantillonnage exhaustif vis-à-vis des variables angulaires de la BRDF est réalisé, généralement à l'aide d'un goniospectrophotomètre [Murray-Coleman 90, Dana 99, Ged 10]. Cette méthode permet une description complète de l'interaction surface/lumière d'une surface localement, mais est très coûteuse en terme de temps d'acquisition et de volume de données à traiter, et cette méthode est ainsi souvent considérée comme incompatible avec une application dans le contexte industriel du contrôle de la qualité d'aspect de surfaces, et particulièrement lorsqu'il s'agit d'inspection (recherche d'anomalies locales). Les récents résultats du Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam apportent de nouvelles mesures physiques de la BRDF grâce à la réalisation d'un goniospectrophotomètre de référence (figure 1.10a) qui possède une résolution angulaire d'au moins  $0.03^\circ$  correspondant à l'acuité visuelle de l'œil humain. Cette référence métrologique permet de mieux comprendre les perturbations les plus compliquées et les plus difficilement observables de la luminance. Le montage expérimental est doté de deux lignes de mesure indépendantes. La première appelée, *la voie spectrale* [Le Breton 15], est dédiée à l'étude de la couleur. La seconde, appelée *la voie spatiale* [Obein 14], est dédiée à l'étude du brillant (*gloss* en anglais). La mesure sur un échantillon de brillant (figure 1.10) montre les petites variations de luminance dans le pic spéculaire. Ces résultats ouvrent la voie à de nouveaux modèles théoriques plus proches de la réalité physique des mesures. La mesure de la BRDF n'est pas facile d'accès mais la compréhension des phénomènes visuels passera toujours par son analyse. Les mesures goniospectrophotométriques permettent de mieux comprendre les relations entre la rugosité et la BRDF, et entre la BRDF et l'aspect des surfaces.

**b) Model-based rendering**, i.e. la modélisation théorique et continue de l'interaction locale de la lumière avec la surface. Le monde de l'image de synthèse développe et propose un nombre important

d’algorithmes qui permettent de modéliser la BRDF. Cette estimation est réalisable pour les surfaces virtuelles, mais la complexité des interactions état de surface/lumière rend son application trop coûteuse dans le cas de surfaces texturées réelles et ce, même sur des serveurs de calcul puissants. Les modèles qui sont aujourd’hui utilisés pour modéliser la BRDF, ont été établis selon des approches différentes (empiriques, géométriques, physiques) auxquelles on associe un niveau de modélisation (macro-, méso-, micro-échelle). Les plus connus et les plus utilisés sont les modèles de : Lambert, Phong et Blinn [Blinn 77] (prise en compte du terme spéculaire), Lafortune [Lafortune 97] (fonctions cosinusoïdales), Ward [Ward 92] (lobes Gaussiens), Schröder et Sweldens [Schröder 95] (ondelettes sphériques), Koenderink [Koenderink 96b] (polynômes de Zernike), Cook et Torrance\* [Cook 82], Oren et Nayar [Oren 94], Beckmann et Spizzichino\* [Beckmann 87], ou encore He\* [He 91] (fondé sur les lois de l’optique ondulatoire). Les modèles indicés par une étoile correspondent aux modèles géométriques ou physiques basés sur une modélisation de la rugosité comme une combinaison de miroirs (microfacettes). Ces dernières se distinguent principalement par le choix de la distribution des microfacettes (distribution des pentes ou des hauteurs, Gaussienne, Lorentzienne, etc.). Dans les domaines de synthèse d’images 3D, on trouve quelques travaux dédiés au rendu des défauts d’aspect. Merillou [Mérillou 01, Bosch 04] reproduit de manière satisfaisante le rendu de rayures spécifiques à partir d’un profil de rayure sur lequel il définit un modèle de réflectance. Ce profil *générique* a été obtenu en recherchant des similitudes géométriques à partir de mesures topographiques de rayures engendrées au moyen d’un indenteur sur des surfaces réelles.

- c) **Image-based rendering**, i.e. une mesure réduite, simplifiée, (estimation de la composante angulaire uniquement) de la réflectance. Cette technique est basée sur l’acquisition de données stéréophotométriques, seule la direction d’éclairage varie entre les images. On parle alors d’image-based rendering, à l’instar des techniques connues sous le nom de *Reflectance Transformation Imaging* [MacDonald 11, Zhang 14b].

Dans ces travaux, nous nous plaçons dans le cadre de cette dernière approche, afin de garantir la compatibilité des outils avec le contexte industriel d’inspection de la qualité d’aspect des surfaces. Bien qu’incomplète en terme spectrale notamment (voir section 1.3.3), cette information de réflectance réduite permet d’enrichir très sensiblement les données et la compréhension des interactions locales états de surface/lumière, en comparaison avec une unique prise de vue, ou encore avec une mesure de topographie conventionnelle par exemple.

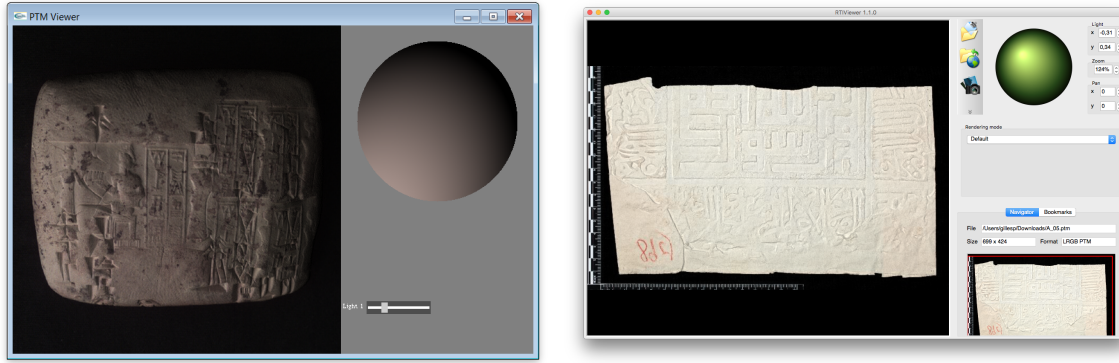
### 1.3 Reflectance Transformation Imaging

En faisant varier les positions d’éclairage, la technique RTI vise à enrichir l’information fournie par les images classiques. Ainsi, chaque pixel est décrit par un ensemble de valeurs, où chaque valeur correspond à une position spécifique d’éclairage. Cet ensemble de valeurs peut être interpolé ou approximé par un modèle continu (fonction). Le modèle le plus connu est basé sur un polynôme du second degré, appelé Polynomial Texture Mapping. L’originalité des méthodes RTI concerne l’espace de représentation des jeux de mesure de luminance, plus pertinente vis-à-vis de la forme complexe des surfaces de luminance. Le paramétrage permet de simplifier leur forme et d’utiliser des descripteurs définis *a posteriori* associés à la géométrie globale obtenue dans cet espace. Ces techniques permettent d’explorer après reconstruction la surface virtuellement sous une direction d’éclairage choisie et ainsi d’enrichir très sensiblement les données et la compréhension des interactions locales de surface/lumière. Depuis l’invention des *Polynomial Texture*

*Mappings* par l'équipe de T. Malzbender (Laboratoires Hewlett Packard, Palo Alto), cette technique s'est largement démocratisée dans le milieu du patrimoine [Proença 09, Earl 10, Duffy 13, Newman 15] grâce à des constructeurs et des visualisateurs RTI très faciles d'utilisation, les deux plus connus sont :

- le PTM Builder et Viewer<sup>3</sup> développés par HP (gratuitiels),
- le RTI Builder et Viewer<sup>4</sup> réalisés au *Cultural Heritage Imaging (CHI)* (logiciels libres).

On retrouve sur leur interface respective (figures 1.11a et 1.11b) l'élément graphique à l'aide duquel l'utilisateur peut contrôler interactivement la direction de la lumière dans le but de mettre en évidence les caractéristiques recherchées sur la surface.



(a) Viewer PTM par HP

(b) Viewer RTI par CHI

FIGURE 1.11 – Visualisateurs RTI

Nous allons voir plus généralement dans cette section les spécifications des données photométriques RTI requises pour la modélisation de la composante angulaire de la BRDF.

### 1.3.1 Spécification des données stéréo-photométriques RTI

On considèrera à focale et ouverture fixes qu'il existe une relation de proportionnalité entre le niveau de gris  $\mathcal{G}$  d'une photographie et la luminance  $L(\vec{u}_c)$  dans la direction du centre optique [Durou 07]. On peut alors exprimer le niveau de gris d'une photographie sous la forme suivante :

$$\mathcal{G} = k * g \quad \text{avec} \quad g = L(\vec{u}_c) \quad (1.8)$$

$k$  est le facteur de proportionnalité, et  $g$  est alors appelé niveau de gris normalisé. Une caméra permet donc d'obtenir une estimation rapide et performante de la luminance d'un ensemble de micro-facettes associées aux pixels des prises de vues réalisées. Le principe de la technique RTI est alors d'obtenir, pour chaque pixel, un ensemble de valeurs de luminance correspondant à différents angles d'éclairages, puis de paramétrer la composante angulaire de la fonction bi-directionnelle du coefficient de luminance (BRDF) à partir des informations discrètes obtenues. La figure 1.12 présente, pour un pixel de coordonnées  $(u, v)$  dans le plan de l'image, les luminances obtenues suite aux différentes directions d'illumination  $(\theta_i, \phi_i)$  mises en œuvre lors de l'acquisition. Le système de prise de vue est fixe  $(\theta_v, \phi_v)$ . La surface de luminance locale modélisée est représentée dans le système de coordonnées spatiales  $(u, v)$ , où  $(l_u, l_v)$  représentent les composantes associées aux directions d'éclairage projetées dans le plan horizontal.  $L$  est la valeur de luminance (ie. le niveau de gris normalisé  $\mathcal{G}$ ) aux coordonnées du pixel. Des angles seront nécessaires pour décrire le modèle

3. Hewlett Packard : <http://www.hpl.hp.com/research/ptm/>

4. Cultural Heritage Imaging : [http://culturalheritageimaging.org/What\\_We\\_Offer/Downloads/View/](http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/View/)

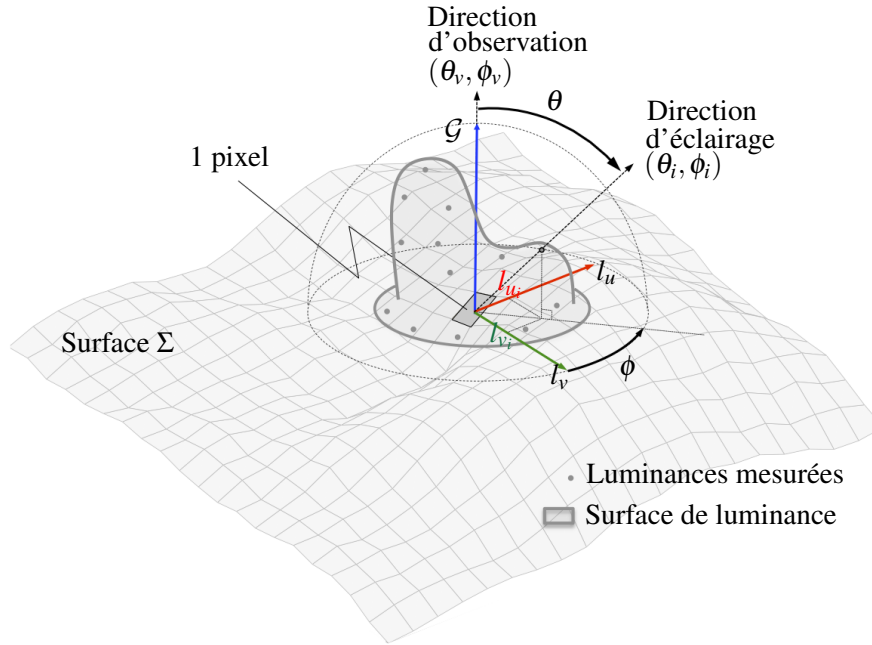


FIGURE 1.12 – Paramétrisation de la réflectance d'un pixel comprenant les valeurs de luminance associées à un élément de surface défini dans le repère local  $(u, v)$

dans le cas des descripteurs des approches HSH et DMD. Ces angles (co-latitude  $\theta$  et azimuth  $\phi$ ) définis dans l'équation 1.9 sont exprimés comme fonction des composantes  $(l_u, l_v)$  liées à la direction d'éclairage.

$$\theta = \arccos(\sqrt{1 - l_u^2 - l_v^2}) \quad \text{et} \quad \phi = \arctan 2(l_u, l_v) \quad (1.9)$$

Si on ne connaît pas a priori les caractéristiques de réflectance de la surface inspectée, l'idéal est de disposer de prises de vues dont les angles d'éclairage sont répartis angulairement de façon homogène. Il est aussi essentiel de maîtriser l'intensité, la position et la direction des sources d'illumination pour assurer la qualité des acquisitions RTI et leur modélisation. Par la suite, nous privilégierons la désignation **surface de luminance** pour désigner la surface qui enveloppe le nuage des valeurs discrètes de luminance.

### 1.3.2 Modèles RTI existants

L'approximation des surfaces de luminance est basée sur des paramétrisations géométriques de complexités variables qui permettent d'approximer (ou d'interpoler) les données discrètes acquises en chaque point. L'objectif consiste globalement à obtenir une description la plus fine et la plus photo-réaliste pour ne pas altérer la perception des surfaces, tout en compactant l'information acquise de façon performante.

#### Polynomial Texture Mapping (PTM)

La technique *Polynomial Texture Mappings* a été développée initialement par l'équipe de Malzbender [Malzbender 01c, Malzbender 00, Malzbender 01a] dans l'objectif d'améliorer le rendu photo-réaliste en imagerie 3D. Dans le cadre de nos travaux, on s'intéresse uniquement à l'application de cette méthode dans l'espace des directions d'éclairage d'une scène. La technique consiste alors à photographier une scène en faisant varier les directions d'éclairage puis à intégrer l'ensemble des données acquises en un seul fichier, appelé *PTM*, dont le calcul et la structure sont décrits dans [Malzbender 01b]. Pour chaque prise de vue réalisée, seul le repère lié à l'orientation de la source lumineuse varie :

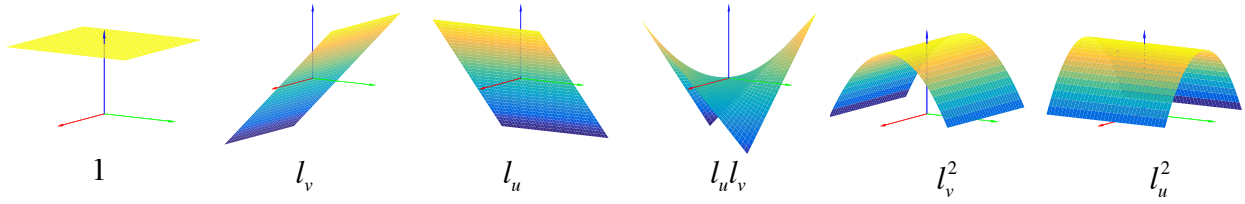


FIGURE 1.13 – Représentation de la base de descripteurs de l'approche PTM

- Les sources lumineuses sont toujours dirigées vers le centre de la surface d'intérêt, i.e orientées suivant les rayons d'une sphère centrée sur la surface analysée. Pour chaque prise de vue, les angles  $(\theta_i, \phi_i)$  liés à la direction de la source lumineuse varient, afin d'obtenir idéalement une répartition homogène des éclairagements sur la demi-sphère normale à la surface inspectée.
- La distance entre les sources lumineuses et la surface est constante afin d'éviter les variations d'intensité et de simplifier le modèle de réémission de la lumière par les surfaces

La technique *Polynomial Texture Mappings* consiste à approximer la composante angulaire de la BRDF à partir des informations discrètes obtenues par chaque prise de vue, afin d'obtenir une paramétrisation continue de la luminance. Cette approximation est réalisée par projection dans une base de fonctions constituée par les termes d'un polynôme à deux variables d'ordre 2 (figure 1.13). L'opération de projection permet de minimiser les écarts avec le nuage de points discrets (luminances) issus des acquisitions stéréophotométriques. Pour chaque pixel, on obtient alors 6 coefficients ( $a_0 - a_5$ ) qui définissent la surface de luminance modélisée (equation 1.10). Cette opération est réalisée par régression linéaire multiple (estimateur des moindres carrés) à partir du système d'équations 1.11.

$$L(l_u, l_v) = a_0 + a_1 l_u + a_2 l_v + a_3 l_u l_v + a_4 l_u^2 + a_5 l_v^2 \quad (1.10)$$

$$\begin{bmatrix} l_{u0}^2 & l_{v0}^2 & l_{u0}l_{v0} & l_{u0} & l_{v0} & 1 \\ l_{u1}^2 & l_{v1}^2 & l_{u1}l_{v1} & l_{u1} & l_{v1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{uN}^2 & l_{vN}^2 & l_{uN}l_{vN} & l_{uN} & l_{vN} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

La détermination du modèle de réflectance simplifié, i.e. ici des 6 coefficients polynomiaux ( $a_0 - a_5$ ) associés à chaque pixel, permet de reconstruire virtuellement la luminance associée à une direction d'éclairage et ainsi d'obtenir un rendu visuel instantané de la surface inspectée, associé à la direction d'éclairage choisie. Les 6 descripteurs polynomiaux de projection présentés dans la figure 1.13 correspondent respectivement à un mode de translation, deux modes d'inclinaison, à un mode décrivant une forme en « selle de cheval » et à deux modes paraboliques. La complexité des modèles de réflexion accessibles en combinant ces formes élémentaires est donc réduite, et conduit à fortement lisser les spécularités et à atténuer les contrastes, comme observé dans la figure 3.2a, qui représente une surface de luminance approximée par la méthode PTM associée à un pixel, à partir d'une acquisition des 96 images réparties de façon homogène.

### Hemispherical Harmonic (HSH)

La technique HSH [Westin 92, Gautron 04] est une évolution de la méthode PTM. Cette méthode consiste à utiliser un espace de projection basé sur une famille de fonctions géométriques appelées harmoniques hémisphériques (HSH), notés  $H_l^m(\theta, \phi)$  ( $l$  est l'ordre et  $m$  le degré). Elles s'expriment à partir des polynômes



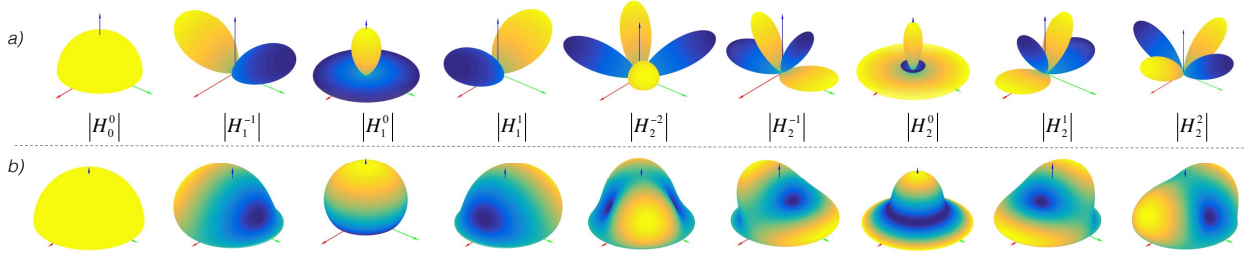


FIGURE 1.14 – Représentation de la base de descripteurs de l'approche HSH de degré  $l$  entre 0 et 2

de Legendre associés, décalés sur l'intervalle  $x \in [0, 1]$  grâce à une transformation linéaire de  $x$  à  $2x - 1$  (equation 1.12). Cette base de fonctions géométriques est plus appropriée pour décrire la complexité des surfaces de luminance estimées à partir des acquisitions stéréo-photométriques.

$$\tilde{P}_l^m(x) = P_l^m(2x - 1) \quad (1.12)$$

Ce décalage du domaine de définition des harmoniques sphériques vers le demi-espace formé par les fonctions hémisphériques permet de se réduire au domaine dans lequel la fonction BRDF est exprimée. En remplaçant  $x$  par  $\cos(\theta)$  dans l'équation 1.12, nous obtenons donc des polynômes définis sur l'intervalle angulaire  $\theta = [0, \pi/2]$  correspondant aux valeurs prises par l'angle polaire sur l'hémisphère. Les polynômes de Legendre  $P_l^m$  peuvent être calculés de manière efficace en utilisant les relations de récurrence données dans l'annexe A.1. Les harmoniques hémisphériques  $H_l^m(\theta, \phi)$  s'expriment alors :

$$H_l^m(\theta, \phi) = \begin{cases} \sqrt{2}\tilde{K}_l^m \cos(m\phi) \tilde{P}_l^m(\cos \theta) & \text{si } m > 0 \\ \sqrt{2}\tilde{K}_l^m \sin(-m\phi) \tilde{P}_l^{-m}(\cos \theta) & \text{si } m < 0 \\ \tilde{K}_l^0 \tilde{P}_l^0(\cos \theta) & \text{si } m = 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

avec la valeur de normalisation  $\tilde{K}_l^m$  suivante :

$$\tilde{K}_l^m = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-|m|)}{2\pi(l+|m|)}} \quad (1.14)$$

Toute fonction décrivant la surface de luminance peut alors se décomposer en une série d'HSBs [Kautz 02, Mudge 08, Krivanek 10, Palma 10, Zhang 14b], d'ordre  $l$  et de degré  $m$  :

$$f_{(\theta_v, \phi_v)}(\theta_i, \phi_i) = \sum_{l=0}^n \sum_{m=-l}^l C_l^m(\theta_v, \phi_v) H_l^m(\theta_i, \phi_i) + R_n \quad (1.15)$$

où les coefficients (contributions)  $C_l^m$  s'obtiennent par projection de  $f$  dans l'espace des fonctions harmoniques hémisphériques.

$$C_l^m(\theta_v, \phi_v) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta_v, \phi_v, \theta_i, \phi_i) H_l^m(\theta_i, \phi_i) \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1.16)$$

Les 9 premiers HSHs sont présentés en figure 1.14 dans leur représentation classique (en jaune les valeurs positives et en bleu les valeurs négatives prises par les fonctions  $|H_l^m|$ ), et sous forme d'écart de forme autour de la demi-sphère de référence (figure 1.14b). La figure 3.2b montre une représentation de la surface de luminance du même pixel approximée par la modélisation HSH. La complexité des fonctions HSH apporte un gain significatif sur l'approximation des surfaces de luminance. En effet, cette méthode d'approximation permet notamment d'améliorer le rendu d'une surface brillante (comportement spéculaire).

### 1.3.3 Comment les méthodes RTI traitent la couleur ?

La couleur dans le rendu RTI apporte généralement peu d'information lorsqu'on s'intéresse aux irrégularités de la surface qui sont de nature géométrique ; la luminance (ie. le niveau de gris) suffit dans ce cas. Elle permet parfois une expérience de visualisation plus confortable pour l'utilisateur. La couleur peut être définie à l'aide de trois attributs : la luminance, la teinte (associée à la notion de couleur : rouge, vert, jaune...) et la saturation. La saturation et la teinte sont les composantes de chromaticité qui reflètent l'aspect qualitatif de la couleur, la luminance correspond quant à elle à l'aspect quantitatif. Il existe de nombreux espaces colorimétriques du fait du besoin croissant de mesure de la couleur, notamment dans les milieux industriels. On distingue les espaces primaires, les espaces uniformes, les espaces perceptuels, d'axes indépendants. Tous ces espaces couleur découlent de la trichomie (RGB) ou des attributs luminance-chromaticité. Quelques espaces couleur, en adéquation avec la sensibilité spectrale humaine, ont cependant été normalisés et s'avèrent largement utilisés en traitement d'images afin de maîtriser la couleur perçue, tels que les espaces LUV ou YCvCr.

Pour les techniques RTI, une hypothèse est souvent faite pour simplifier la reconstruction de la couleur dans la direction d'éclairage choisie. Comme la chromaticité (ie. la couleur sans la luminance) d'un pixel est relativement constante en faisant varier l'incidence de la lumière, nous pouvons calculer la chromaticité en estimant la médiane des valeurs R, G et B de l'ensemble des images d'acquisition au pixel considéré. Dans [Drew 12, Zhang 14b], la chromaticité  $\chi$  est définie sur tous les pixels pour chaque canal R, G et B (resp.  $j = 1, 2, 3$ ) comme :

$$\chi_j = \text{median}_{i \in (\omega=1)} \{C_j^i / L^i\} \quad (1.17)$$

avec  $\omega = 0$  pour les valeurs non-Lambertiennes (spécularités et ombres) et où les images d'entrée R, G ou B sont notées  $C_j$ . Les valeurs non-Lambertiennes peuvent être identifiées grâce à de nombreuses méthodes qui varient en complexité, dont certaines sont décrites dans les références précédentes. Un moyen simple consiste à définir une matrice de poids  $W$  binaire où l'entrée est égale à zéro si la luminance est comprise entre deux seuils prédéfinis  $\tau_1$  et  $\tau_2$ , afin de réduire l'influence des ombres et des spécularités dans l'estimation de la chromaticité. Typiquement,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont définis comme le 5<sup>ème</sup> et le 95<sup>ème</sup> centiles de l'histogramme des luminances de chaque pixel. Cette approximation de la chromaticité a comme avantage d'être rapide et de donner des résultats qui sont proches de ceux obtenus en appliquant l'approximation RTI (PTM, HSH ou DMD) séparément sur les trois canaux RGB. Ainsi, le produit de la luminance interpolée et de la chromaticité permet de reconstruire virtuellement une image, **en couleur**, de la surface associée à une direction d'éclairage et ainsi d'obtenir un rendu visuel instantané de la surface inspectée, associé à la direction d'éclairement choisie.

### Voie multi-spectrale

L'utilisation des méthodes RTI a été étendue à l'analyse multi-spectrale. Dans ce sens, différents groupes de recherche dans les domaines du patrimoine culturel et naturel proposent l'utilisation de sources lumineuses dont les longueurs d'onde sont dans le spectre du non-visible et de caméras adaptés [Caine 11, November 12]. Les infrarouges peuvent par exemple pénétrer des couches de vernis et de couleurs qui ont vieilli ou se sont oxydées. Ces approches peuvent également révéler les étapes de création d'un artéfact, les détails cachés, les effets de dégradations ou les différences de matériaux. Des résultats probants ont été ob-

tenus sur l'étude de palimpsestes<sup>5</sup> ou de tableaux<sup>6</sup>. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes limités à l'étude des interactions lumière/surface à partir d'acquisition RTI réalisée avec des sources lumineuses en lumière blanche dans le but de reproduire les conditions d'illumination des surfaces dans un environnement « naturel ».

## 1.4 Altitudes, pentes et courbures de la surface

Nous proposons d'aider à mieux comprendre les relations entre la géométrie et l'aspect de la surface en menant une analyse sur les pentes et les courbures.

Les altitudes, les pentes et les courbures, peuvent être comparées à un tryptique de grandeurs physiques largement étudiées en mécanique : le déplacement, la vitesse et l'accélération. Parmi ces dernières, c'est souvent la vitesse qui focalise l'attention, par exemple dans le domaine des vibrations industrielles, la majorité des normes portent sur la vitesse car historiquement les capteurs de vitesse ont précédé l'invention des accéléromètres. Aujourd'hui, l'accéléromètre est de plus en plus répandu car il permet d'accéder à de nombreuses autres grandeurs en s'affranchissant des effets d'une dérivation mathématique du signal. Similairement dans le domaine de l'aspect, on se réfère souvent à la topographie car elle est familière au plus grand nombre et ne nécessite donc pas de compétences particulières pour être lue. Pourtant, de nombreux phénomènes et interactions liées aux surfaces ne sont pas directement liés à l'information topographique d'altitude, ou aux indicateurs statistiques calculés comme nous avons pu le voir dans le début de ce chapitre, mais à la notion de courbure.

Il n'existe pas à notre connaissance de moyens de mesure directs de l'information en courbures. Par conséquent, l'information en courbures d'une surface est généralement obtenue par une double dérivation des altitudes de la surface [Roberts 01, Le Port 09, Andersson 09, Rose 09]. L'avantage de la méthode RTI est de fournir des données stéréophotométriques de la surface qui permettent par une approche « lumière inverse » de retrouver la normale en chaque point de la surface apparente. Le passage d'une grandeur photométrique, la luminance, à une grandeur géométrique, la normale à la surface à partir des images obtenues par un dispositif RTI est donnée dans la section suivante 1.4.1. L'obtention des courbures à la surface nécessite ainsi une seule opération de dérivation limitant ainsi l'influence du bruit dans la mesure.

### 1.4.1 Relation entre la luminance et la normale à la surface

La stéréophotométrie a été introduite par Woodham [Woodham 80], elle permet de retrouver la normale en chaque point visible d'un objet à partir de plusieurs photographies prises sous le même point de vue mais pour des directions d'éclairages différentes. Il s'agit d'une extension du cas spécial de *shape-from-shading* [Horn 86, Horn 90] où la donnée pour estimer le champs de normales est une image unique, qui est connue pour son caractère mal posé. Les techniques stéréophotométriques supposent généralement que la surface de l'objet inspecté suit le modèle de réflectance Lambertien ; ie. la luminance observée  $L$  en chaque point de la surface est proportionnelle au cosinus de l'angle incident d'éclairage, ou, sous forme vectorielle,

---

5. Integrating Spectral and RTI (National Endowment for the Humanities) : <http://palimpsest.stmarytx.edu/integrating/index.html>

6. Blog de RTiCAN (Research, Art Conservation and Archeology) : <http://rtiican.wordpress.com/2010/01/10/irr-rti-using-osiris/>



au produit scalaire de la normale à la surface  $v$  et de la direction d'éclairage  $S$  :

$$L = \rho S \cdot v \quad (1.18)$$

où  $\rho$  est la valeur scalaire constante représentant la réflectance.

Maintenant supposons que nous ayons un lot de  $m$  images d'une surface prises sous un point de vue fixe avec un temps d'exposition constant mais chacune éclairée dans des directions d'éclairage différentes. Nous notons  $S_i$  la  $i$ ème direction d'éclairage, et  $S = [S_1, S_2, \dots, S_m]^T \in \mathbb{R}^{m \times 3}$  la série de toutes les directions d'éclairage. Pour chaque pixel  $k$ , il y a  $m$  luminances observées  $L_k = (L_{k,1}, L_{k,2}, \dots, L_{k,m})^T \in \mathbb{R}^m$ . On obtient alors un système linéaire de  $m$  équations 1.18 qui est donné par l'expression suivante :

$$L_k = \rho_k S \cdot v_k \quad (1.19)$$

où  $\rho$  est la réflectance du pixel  $k$ . Par conséquent, la normale à la surface  $v_k$  peut être simplement obtenue à l'aide d'une méthode des moindres carrés :

$$v_k = S^+ L_k / \rho_k \quad (1.20)$$

où

$$\rho_k = \|S^+ L_k\| \quad (1.21)$$

et

$$S^+ = (S^T S)^{-1} S^T \quad (1.22)$$

est la pseudo-inverse de Moore-Penrose.

L'équation 1.20 peut être étendue afin de traiter tous les pixels simultanément. Pour une image avec  $K$  pixels au total, nous construisons une matrice  $L \in \mathbb{R}^{m \times K}$  de tous les  $m \times K$  observations de luminance :

$$L = (L_1, L_2, \dots, L_K) \quad (1.23)$$

Similairement à l'équation 1.20, la normale à la surface de tous les pixels s'obtient en résolvant :

$$N = S^+ L \quad (1.24)$$

où  $N = (v_1, v_2, \dots, v_K) \in \mathbb{R}^{3 \times K}$  est une matrice de  $K$  colonnes représentant les normales à la surface à l'endroit des  $K$  pixels. Trouver un couple  $(L_k, v_k)$  tel que  $L_k = \rho S \cdot v_k$  n'est pas suffisant pour l'estimation de la normale. En effet, il existe une infinité de normales d'une surface produisant les mêmes niveaux de luminance lorsqu'on éclaire cette dernière dans une direction particulière. Cela est inhérent à la modélisation linéaire du problème, associée au modèle Lambertien.

Pour illustrer cette ambiguïté, nous pouvons prendre le cas d'un objet 3D dont nous avons simulé l'apparence sous une direction d'éclairage particulière. L'exemple suivant de résolution d'un problème de stéréophotométrie est largement inspiré de l'exemple proposé dans l'article de Durou [Durou 12] qui a valeur pédagogique. Les effets de l'éclairage sur la surface 3D, en l'occurrence ici un fémur (figure 1.15), ont été réalisés à l'aide des algorithmes d'éclairage de Matlab et en spécifiant la propriété de réflectance de l'objet de sorte que le comportement de sa surface suive le modèle Lambertien. Considérons maintenant un point sur la surface du fémur associée à une normale  $v$  dont nous cherchons une estimation. Nous pouvons tracer l'**isophote**, c'est-à-dire l'ensemble des points sur une sphère Lambertienne éclairée dans la même direction que le fémur, qui possèdent le même niveau de gris que le point considéré sur le fémur. Le cas  $m = 1$  éclairage (figure 1.15) illustre le cas général d'un problème de Shape-From-Shading car il existe une infinité de candidats possibles sur l'isophote repérée par un cercle magenta pour l'estimation de la normale.

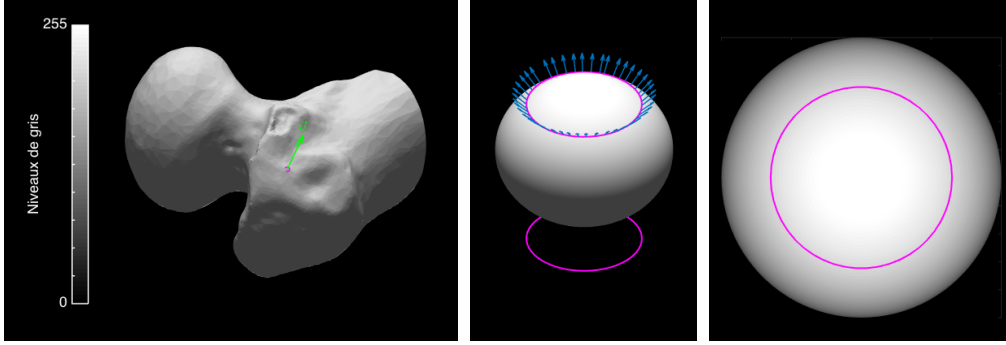


FIGURE 1.15 – Cas  $m = 1$ , une infinité de candidats possibles (flèches bleues) pour l'estimation de la normale  $\vec{v}$  (flèche verte)

Le cas  $m = 2$  (figure 1.16) montre qu'on passe d'une infinité de solutions à deux solutions, c'est-à-dire que l'ajout d'un deuxième éclairage suffit à rendre le problème mieux posé.

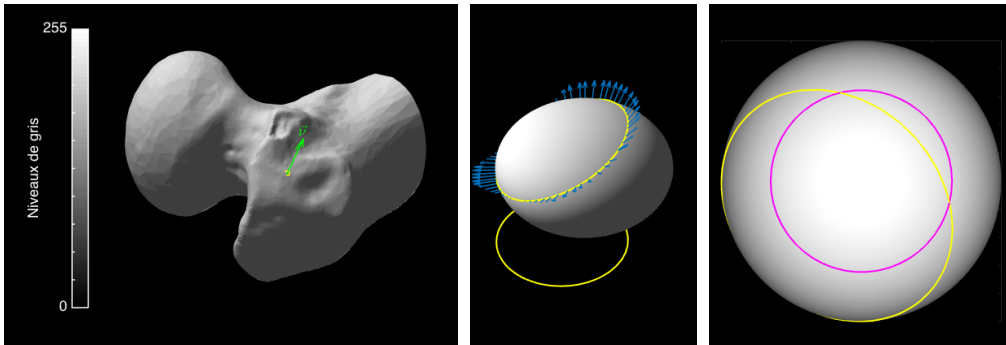


FIGURE 1.16 – Cas  $m = 2$ , deux candidats possibles par intersection des deux isophotes

Enfin le cas où l'on dispose de  $m \geq 3$  éclairages non-coplanaires (figure 1.17) permet de lever l'ambiguïté sur l'estimation de la normale car les isophotes ont une intersection unique, autrement dit la pseudo-inverse de la matrice  $S$  du système est définie sous l'hypothèse Lambertienne.

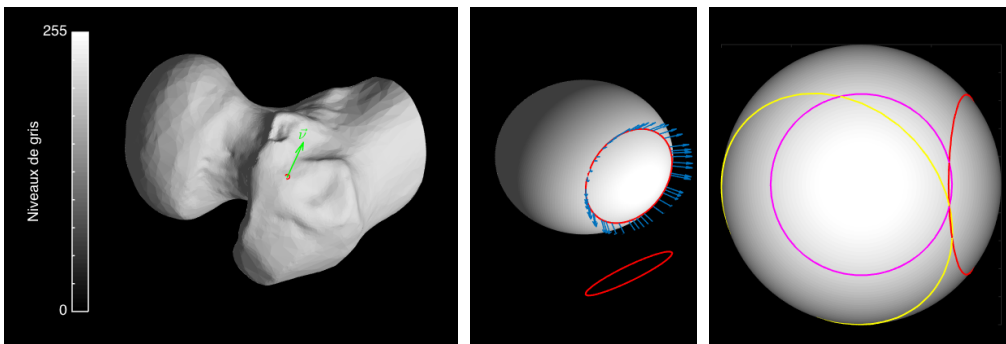


FIGURE 1.17 – Cas  $m = 3$ , ambiguïté levée sur l'estimation de la normale : illustration du principe des techniques stéréophotométriques par intersection d'isophotes

Le modèle Lambertien n'est pas approprié pour le cas de nombreuses surfaces réelles, notamment les cas de surfaces spéculaires. La présence d'ombres, de tâches spéculaires ou de réflexions mutuelles sont plusieurs exemples d'écarts à la loi de Lambert. Il est possible de considérer les points en question comme des données aberrantes dans un processus d'estimation robuste [Zhang 14a]. Le prétraitements des images

a fait l'objet de nombreuses approches qui cherchent à identifier les pixels où se produisent ces phénomènes afin de les rejeter de l'estimation. Il est possible d'utiliser un modèle plus élaboré [Georghiades 03] qui tiendrait compte directement des composantes non-Lambertiennes (Torrance et Sparrow, Oren-Nayar, Phong ou les nombreux autres modélisations de réflectance) cependant on perdrait la linéarité du problème, ce qui rendrait la résolution bien plus difficile et bien moins rapide. D'autres approches possibles sont présentées dans la partie suivante pour pouvoir conserver la linéarité du problème en s'affranchissant de l'hypothèse Lambertienne et reconstruire.

### 1.4.2 Estimation robuste de la normale dans le cas des surfaces réelles

Au lieu de rejeter les observations non-Lambertiennes (tâches spéculaires et ombres) comme des données aberrantes, d'autres approches permettent de minimiser leur influence dans l'estimation de la normale. Des études utilisent un objet d'apprentissage, il s'agit ainsi d'apprendre les normales sur un objet de relief connu, typiquement une sphère faite du même matériau. Une table de correspondance (*look-up table*) est réalisée afin d'établir la relation entre la normale et la luminance observée en chaque point de la surface de la sphère. Ensuite les normales de la surface de l'autre objet avec une réflectance similaire à l'objet d'apprentissage peuvent être déduit simplement à l'aide de la table de correspondance définie préalablement.

Sur ce principe général, la technique Gelsight (figure 1.18a) obtient des résultats étonnants en utilisant une membrane élastique comme objet d'apprentissage. Le capteur *GelSight* [Johnson 09, Raj 11] est un dispositif de mesure avec contact comprenant un tampon élastomérique transparent recouvert d'une membrane opaque composée de fines particules réfléchissantes, couplé avec un disque de verre autour duquel sont disposés six LEDs également espacées. La lumière provenant des LEDs se propage à travers le disque de verre et le capteur élastomérique par le phénomène de réflexion totale. Lorsque le tampon est pressé contre la surface d'un objet, la membrane épouse les formes de la surface. Un système optique (caméra) vient mesurer les variations de luminance dues aux déformations de la membrane en capturant une image pour chacune des directions d'éclairage. Par conséquent, un algorithme de stéréophotométrie par apprentissage peut être utilisée pour estimer les normales à la surface de l'objet.

Contrairement aux autres techniques existantes de mesure photométrique telle que la microscopie confo-

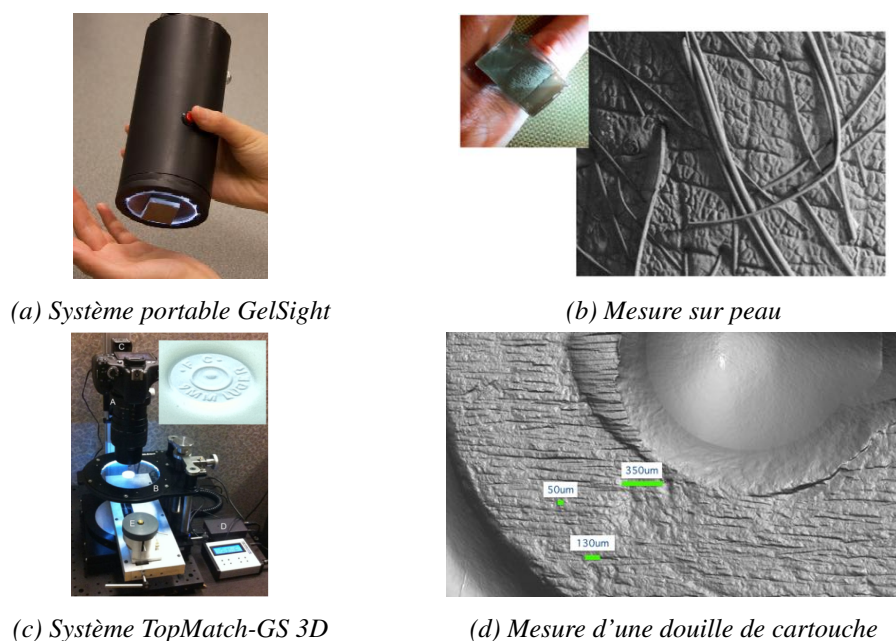


FIGURE 1.18 – Capteur élastomérique

cale, le système n'est pas affecté par les caractéristiques optiques de la surface mesurée ; il capture la même géométrie quelles que soient les propriétés de la surface (mate, brillante ou transparente) car la membrane fait l'interface. Il reste toutefois nécessaire que le capteur soit au contact de la surface ce qui peut être une cause de dégradations de l'objet inspecté. Des études de déploiement [Lilien 15] ont été notamment menées avec des laboratoires de sciences *forensiques* (ie. l'ensemble des différentes méthodes destinées à résoudre des enquêtes judiciaires) où elle permet entre autres à un examinateur formé aux armes à feu de localiser facilement les crêtes et les concavités pour caractériser des douilles de cartouche (figures 1.18c et 1.18d).

Nous nous limitons dans ces travaux à une approche classique de la stéréophotométrie en résolvant l'équation 1.24. Pour garantir la **robustesse** impliquant une insensibilité aux écarts dûs à la non-conformité des hypothèses sous-jacentes au modèle Lambertien, des résultats [Zhang 15] montrent qu'en multipliant les directions d'illumination de la surface, on obtient une augmentation significative de la confiance sur le calcul du champ de normales, ce qui est essentiel pour garantir le lien géométrique avec la fonction d'apparence des surfaces à partir de ces données. Plus nous disposons d'éclairage, plus nous réduisons l'incertitude de justesse dans l'estimation de la normale sans connaissances *a priori* de la surface. Nous allons voir maintenant comment à partir de ces données obtenir l'information en courbures.

### 1.4.3 Information en courbure

Le calcul des courbures est généralement obtenu à partir du nuage de points de mesures de topographie, c'est à dire une information discrète de la surface. Nous présentons les trois principales difficultés inhérentes aux deux opérations successives de dérivation et au traitement de l'information obtenue.

- La première difficulté est liée au choix du pas de dérivation. Pour un signal à 2 dimensions, on peut par exemple se baser uniquement sur les deux voisins du point de calcul pour calculer la dérivée numérique et obtenir la pente locale, puis réitérer l'opération pour obtenir l'information en courbure. Si la pente (puis la courbure) est calculée à partir de  $x$  points autour de chaque point de calcul, la valeur obtenue change alors très sensiblement. Ainsi, de façon analogue, la notion d'échelle est essentielle pour le calcul des champs de courbure d'une surface.
- La seconde difficulté est liée à la sensibilité de l'opération de dérivation numérique aux composantes très hautes fréquences, et particulièrement dans notre cadre au bruit potentiellement présent dans la mesure, et à la présence de points aberrants. Une illustration de cette difficulté est présentée pour un signal 2D dans la figure 1.19, dans le cas d'une unique étape de dérivation.

Pour obtenir des cartographies en courbures significatives, il est donc nécessaire de s'assurer de la sensibilité de la méthode mise en œuvre vis-à-vis du bruit et des points aberrants. L'approche consiste à s'assurer de maîtriser le rapport signal-bruit entre l'information en altitudes et l'information en courbures.

- Enfin, le calcul des courbures conduit à obtenir 3 champs de courbures, qui sont les 3 composantes distinctes du tenseur de courbure. Pour que l'interprétation soit possible, il est souvent nécessaire de compacter cette information en un indicateur, à la manière de ce qui est pratiqué en mécanique des matériaux pour les contraintes. On cherchera alors à obtenir un indicateur de **courbure équivalente**, qui a un sens physique en lien avec la fonction (de la surface) analysée. Cet aspect essentiel, lié au traitement de l'information en courbure est développé plus en détail dans le chapitre 5.

Nous présentons ici les concepts fondamentaux liés aux courbures de surface, puis nous montrons comment cette information est définie et calculée dans le cas continu, à partir de l'information en altitude de la surface. La courbure est une propriété qui décrit le taux de changement de direction d'une courbe, ou d'une surface dans une direction donnée. Dans un espace à deux dimensions, la courbure d'une courbe en un point est l'inverse du rayon d'un cercle tangent appelé cercle osculateur. La courbure  $k$  correspond alors

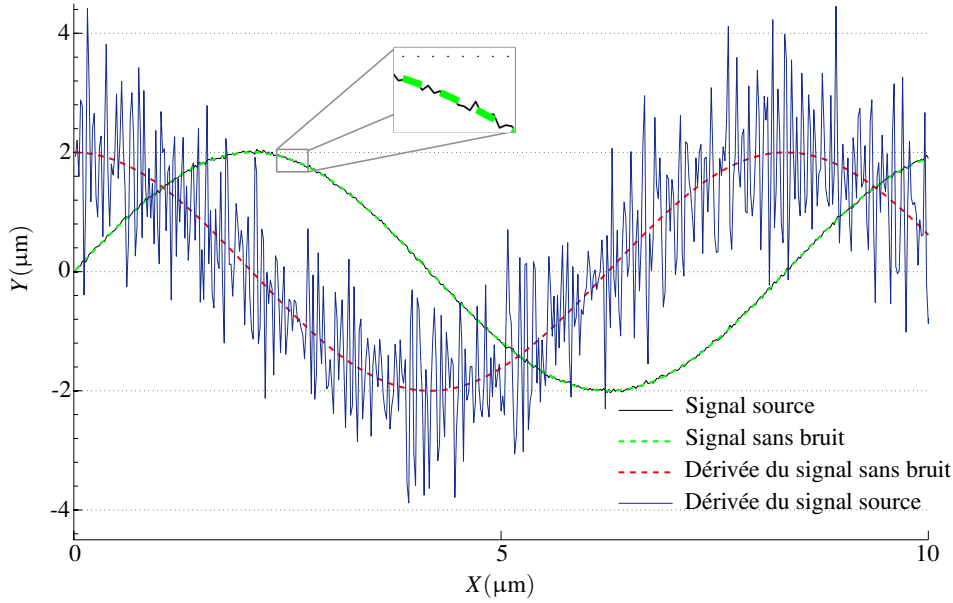


FIGURE 1.19 – Derivation d'un signal bruité (Bruit gaussien blanc d'amplitude 1/100)

au taux d'évolution de l'angle tangent à un profil  $\theta$  par rapport à son abscisse curviligne  $s$  [Van Vliet 93, Roberts 01, Le Port 11], et est définie par l'équation :

$$k = \frac{d\theta}{ds} \quad (1.25)$$

Si on considère une fonction de la forme  $y(x)$ , la courbure  $k(x)$  s'écrit alors sous la forme :

$$k(x) = \frac{d^2y/dx^2}{(1 + (dy/dx)^2)^{3/2}} \quad (1.26)$$

Dans un espace à trois dimensions défini par les axes  $(x, y, z)$  orthogonaux, l'expression d'une surface dans le cas bijectif est du type  $z = f(x, y)$ . Les pentes calculées sur les axes  $x$ , et  $y$  sont alors obtenues par dérivation de l'information en altitude (equation 1.27) :

$$\begin{cases} D_X = \frac{\partial z}{\partial x} \\ D_Y = \frac{\partial z}{\partial y} \end{cases} \quad (1.27)$$

D'après la définition donnée précédemment, la courbure en un point est définie comme étant le taux de changement de direction d'une courbe. Pour des petits angles, le tenseur de courbure peut être approximé par la relation :

$$K = \begin{Bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \end{Bmatrix} \quad (1.28)$$

Le tenseur de courbure définit entièrement l'état de courbure d'un point de la surface. Cependant, afin de faciliter l'interprétation, on cherche généralement à se ramener à un indicateur scalaire unique de courbure équivalente. La définition et les caractéristiques des principaux indicateurs de courbures sont décrits dans le chapitre 5.

### 1.4.4 Applications de la mesure des courbures

L'analyse d'aspect des surfaces à partir de l'information en courbures a fait l'objet de plusieurs réalisations :

- (i) Une réalisation industrielle sous le nom du système ONDULO de la société Visuol [Surrel 99, Surrel 12]. La figure 1.20 montre un exemple d'analyse en courbure réalisée sur une aile de voiture par ce système. Les courbures sont calculées par dérivation des pentes obtenues par la technique de déflectométrie. Cette technique ne s'applique qu'aux surfaces réfléchissantes. Il incombe à l'expert de définir les seuils de la procédure de segmentation pour décider de la conformité du produit à partir de la cartographie étendue des écarts de courbure (figure 1.20c).

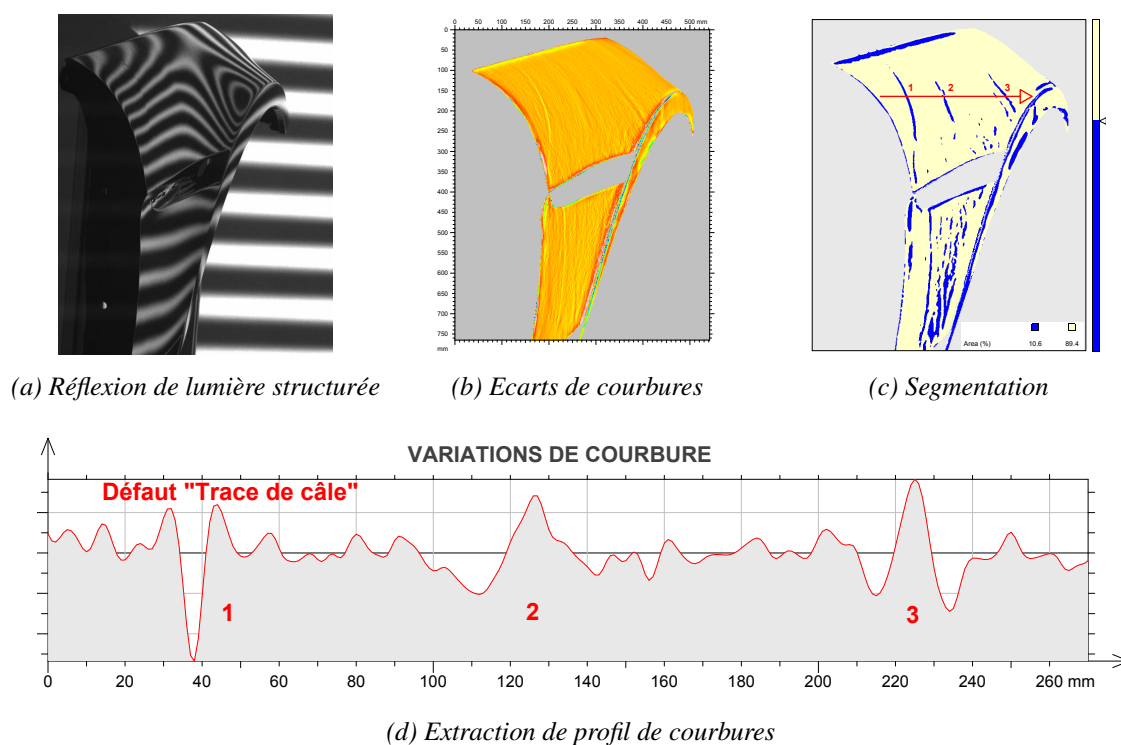


FIGURE 1.20 – Analyse en courbure par le système ONDULO d'une aile d'automobile injectée [Visuol 12]

- (ii) Les travaux de doctorat de Ridel [Ridel 13, Ridel 14] sur une interface tangible pour l'inspection géométrique d'objets (artéfacts archéologiques) en Réalité Augmentée Spatiale (RAS). Le système est appelé « la Lampe torche magique ». L'objectif de la technique est d'explorer la surface en projetant de l'information numérique sur l'objet physique pour mieux comprendre sa géométrie. Plusieurs modalités peuvent être représentées : le mode *courbures* (figure 1.21a) ou le mode *Radiance Scaling* (figure 1.21b). Le mode direct de visualisation des courbures consiste à projeter les convexités en rouge, et les concavités en bleu. L'observateur peut agir en temps réel en modifiant notamment l'échelle de courbure à l'aide d'une torche qu'il rapproche ou éloigne de l'objet. Le mode *Radiance Scaling* consiste à accentuer les contrastes de luminance à l'endroit des fortes variations de pentes (ie. fortes intensités de courbures). Cette technique est particulièrement intéressante pour mieux comprendre les variations géométriques de la surface sans avoir à basculer entre l'objet réel et sa représentation 2D virtuelle sur un écran qui demande un effort cognitif supplémentaire.



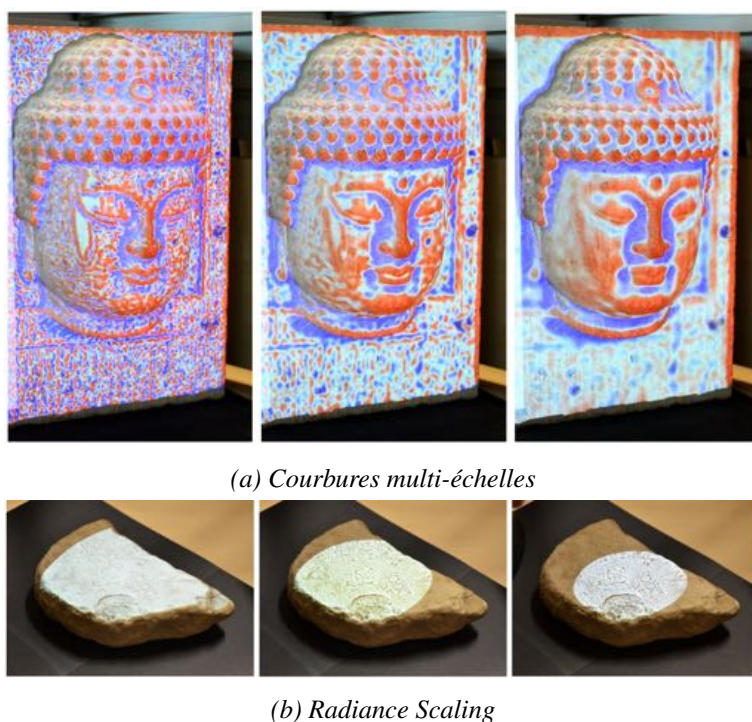


FIGURE 1.21 – Réalité Augmentée Spatiale [Ridel 14]

- (iii) les travaux de doctorat de Rugis [Rugis 08, Rugis 06] sur les données du projet de numérisation 3D du David de Michel-Ange. Rugis utilise des cartographies de courbures pour identifier des caractéristiques locales sur la surface. Ces caractéristiques de courbures sont ensuite enregistrées sous la forme d'histogramme-modèle en vue d'une mise en correspondance entre plusieurs surfaces pour pouvoir reconstruire à partir d'une succession de scans 3D la sculpture complète. Les marqueurs de courbure utilisés pour la correspondance sont de type indents comme illustré sur la figure 1.22.

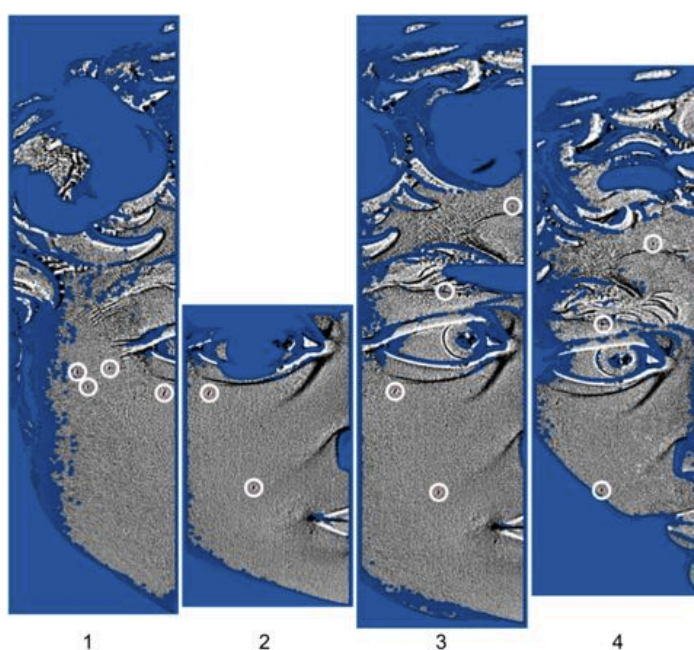


FIGURE 1.22 – Marqueurs identifiés sur les cartographies en courbures, selon [Rugis 08]

Comme une cartographie plane des courbures est la projection d'un espace multidimensionnel, les courbures et les directions sont plus ou moins préservées par la représentation. Nous proposons un nouvel indicateur de courbure qui conserve la direction dans le chapitre 5.

## 1.5 Conclusion

Nous avons posé dans ce chapitre des bases pour les méthodes et les concepts qui vont être développés et utilisés dans les chapitres ultérieurs. La nature hétérogène de cette partie est en liaison avec le caractère pluridisciplinaire de la problématique de maîtrise de l'aspect de surface. Nous avons vu les inconvénients d'une approche classique de la mesure des états de surface pour établir une relation avec la fonction d'apparence car de nombreuses surfaces d'aspects différents peuvent conduire à des paramètres rugosimétriques statistiques identiques. Le lien avec l'aspect global de la surface est cependant moins problématique que la corrélation avec des événements locaux tels que des anomalies d'aspect. Nous avons introduit la notion de saillance et le principe des modèles de saillance existants dont le but est de fournir une cartographie localisant les régions dans l'image qui attirent spontanément notre regard. Le système visuel humain sélectionne en faveur du stimulus qui est le plus saillant.

Pour établir un modèle de saillance ou définir des grandeurs relatives à l'aspect, il faut s'intéresser aux interactions de la lumière avec la surface. Nous avons proposé un rappel des grandeurs photométriques ainsi que des types de réflexion afin de mieux comprendre de quel stimulus l'aspect tire son origine. Comme l'apparence varie selon les directions d'observation et d'illumination, les propriétés de réflexion lumineuse nécessitent la mesure d'une fonction bi-directionnelle qui fait intervenir les angles d'observation et d'illumination. Cette fonction est appelée la fonction bidirectionnelle du coefficient de luminance (BRDF). Nous avons exposé les différents types d'approche qui ont été développés afin d'acquérir et de modéliser la BRDF des surfaces. Nous avons opté pour les techniques RTI qui permettent d'accéder simultanément à une estimation réduite et simplifiée de la BRDF et à une estimation des normales à la surface. Les spécifications d'acquisition RTI et les modèles existants pour approcher la forme de la surface de luminance ont fait l'objet d'un état de l'art détaillé.

La structuration et le lien entre les types de donnée est synthétisée dans la figure 1.23. A partir des normales obtenue grâce à l'équation générale de la stéréophotométrie, nous pouvons dériver cette information pour obtenir l'information en courbures. Nous nous intéresserons à l'acquisition de l'information en courbure utilisée dans ces travaux dans le but de caractériser la micro-géométrie de la surface.

Nos apports de recherche présentés dans la suite du document concernent les aspects théoriques et expérimentaux relatifs à l'acquisition et à l'exploitation des données d'acquisition RTI afin d'extraire les facteurs influents qui interviennent dans l'appréciation visuelle d'une surface, et de fournir des outils performants pour l'inspection, l'analyse et la maîtrise de la qualité d'aspect des surfaces réelles à partir de ces données.



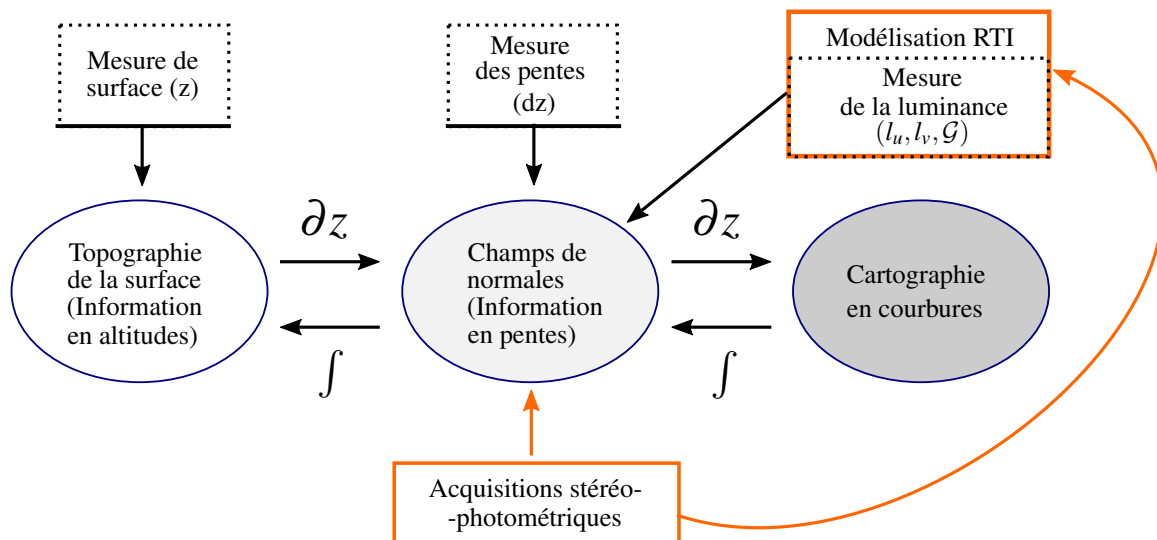


FIGURE 1.23 – Structuration et lien entre les types de données

## Dispositif d'acquisition MeSurA

### Sommaire

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>36</b>
<b>2.2</b>	<b>Développements matériels</b>	<b>36</b>
2.2.1	Architecture des dispositifs RTI	36
2.2.2	Sphère MeSurA	38
2.2.3	Etalonnage et maîtrise des incertitudes	45
2.2.4	Répétabilité, reproductibilité et stabilité	48
2.2.5	Capabilité	49
<b>2.3</b>	<b>Développements logiciels</b>	<b>51</b>
2.3.1	Logiciels RTI	52
2.3.2	Formalisation du processus d'inspection	53
<b>2.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>55</b>

## 2.1 Introduction

Nous avons exposé dans le chapitre précédent les différents types d'approche qui ont été développés afin d'acquérir et de modéliser la BRDF des surfaces. Notre choix s'est porté sur la mise en œuvre des techniques RTI. Ces dernières permettent de « recréer » du signal entre les valeurs discrètes mesurées (luminances). L'originalité des méthodes RTI concerne l'espace de représentation des jeux de mesure de luminance qui permet de simplifier leur forme. En chaque point de la surface apparente de l'objet, les luminances sont définies dans le repère associé  $(l_u, l_v, \mathcal{G})$  présenté dans la section 1.3.1. La modélisation continue permet alors de reconstruire virtuellement le rendu de la surface sous n'importe quelle direction d'éclairage choisie. La qualité de modélisation de la surface de luminance est conditionnée en partie par le dispositif d'acquisition RTI utilisé. Nous avons souhaité que celui-ci soit ouvert en terme de recherche, permettant d'envisager le contrôle de tout type de pièce.

Ce chapitre comporte deux parties afin de présenter l'approche globale retenue et les différentes parties qui composent le système RTI à la fois matérielle et logicielle. Dans un premier temps, nous présentons les améliorations liées au dispositif MeSurA par rapport aux systèmes RTI existants afin de progresser dans la mesure des données d'acquisition et de réduire l'incertitude de mesure : maîtrise des sources d'éclairage, extension des points de vue, rapidité de l'acquisition. Ces développements permettent de proposer conjointement des spécifications de la machine d'inspection en terme de capacité et d'avancer vers une réelle métrologie de l'aspect. Dans un second temps, nous présentons les différents outils des interfaces graphiques développées dans le cadre de ces travaux qui ont pour but de faciliter la tâche des opérateurs et l'interprétation des résultats issus des différentes chaînes de traitement. L'objectif est d'automatiser au maximum le processus d'utilisation qui irait dans le sens d'une meilleure formalisation du processus de contrôle de la qualité d'aspect. Le logiciel final appelé *MsaTool*<sup>®</sup> intègre un nouveau paramétrage des surfaces de luminance, appelé *Décomposition Modale Discrète* (DMD). La DMD est une paramétrisation plus fidèle en terme de forme de la répartition angulaire de la luminance réfléchie par une surface. Le principe de cette décomposition fera l'objet d'une présentation détaillée dans le chapitre 3.

## 2.2 Développements matériels

La réalisation du premier système au cours des travaux de doctorat de Le Goïc [Le Goïc 12] a permis de montrer comment la technique PTM, largement utilisée pour des applications du patrimoine, peut apporter aussi des solutions d'amélioration des pratiques industrielles lors du contrôle d'aspect des surfaces. La première contribution de ces travaux est la construction d'un second prototype basé sur les voies d'amélioration du premier, ouvrant ainsi des perspectives originales de traitement des luminances observées. Par ailleurs, cette recherche liée à l'instrumentation de la mesure vise à apporter des réponses aux exigences industrielles pour l'inspection des surfaces de produit à forte valeur ajoutée.

### 2.2.1 Architecture des dispositifs RTI

La méthode originale [Malzbender 05] utilise pour l'acquisition des données stéréophotométriques un dôme rigide opaque, où des éclairages directionnels en lumière blanche sont répartis de façon homogène sur la surface intérieure. Le système de prise de vue est fixé au centre du dôme, verticalement à la surface inspectée, et est modulable en fonction du type et de la taille des objets à analyser (focale, profondeur de champs, ...). Le premier dispositif (figure 2.1a) réalisé au laboratoire SYMME reprend cette architecture.

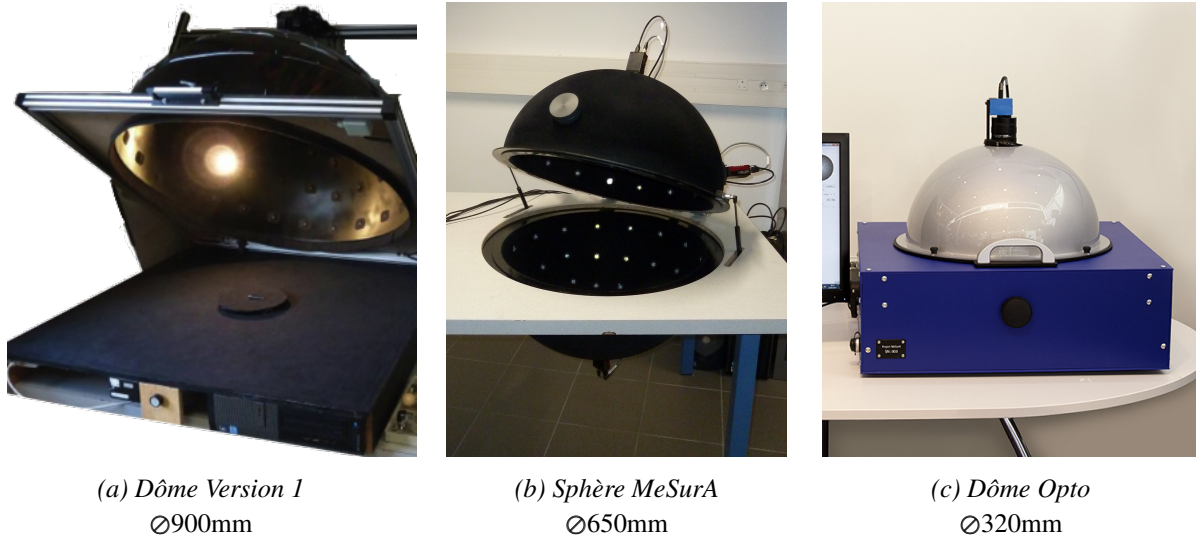


FIGURE 2.1 – Architectures des dispositifs d'acquisition RTI du projet MeSurA

Dans certains cas, les contraintes intrinsèques à l'objet ou à son environnement peuvent cependant restreindre le déploiement de la méthode. Un protocole d'acquisition manuel H-RTI (figure 2.2), où les sources lumineuses sont positionnées approximativement à égale distance de la surface permet alors de réaliser l'acquisition des données (simple à mettre en œuvre, homogénéité de la répartition des éclairages non maîtrisée, coûteux en temps).



FIGURE 2.2 – Un protocole d'acquisition manuel (H-RTI)

Un autre dispositif, spécialement approprié pour les surfaces de taille importante consiste à disposer une ou plusieurs sources lumineuses sur un arc motorisé en rotation.

Ces dispositifs mettent en œuvre un unique point de vue, normal macroscopiquement à la surface inspectée, ce qui peut induire une limitation forte pour l'inspection 3D de certains objets/surfaces. Ainsi, les développements apportés sur le dispositif utilisé dans cette étude, appelé la Sphère MeSurA (figure 2.1b), sont principalement axés sur :

- L'élargissement du champ de vision : un système multi-caméras, supporté par une sphère rigide permet d'observer en une acquisition unique l'ensemble des champs d'une pièce 3D, et ainsi de limiter la manipulation des produits à inspecter. En terme de traitement, ce système ouvre aussi des perspectives de développements liés aux aspects reconstruction 3D et analyse des pentes/courbures.
- La maîtrise de la qualité des données : un système de réglage fin en position des caméras (figure 2.3a) et des sources lumineuses (figure 2.3b) a notamment été mis en œuvre afin de permettre l'ajustement de l'orientation des source lumineuses et de leurs optiques.

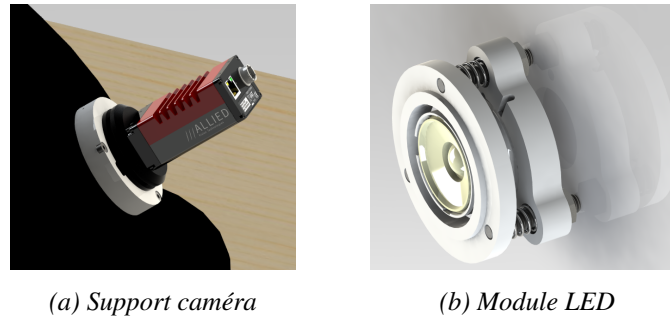


FIGURE 2.3 – Systèmes de réglage de la sphère MeSurA

- L'automatisation : les temps d'acquisition, de transfert et de traitement des données sont significativement réduits par les choix matériels (caméras haute vitesse et système d'acquisition appropriés) et les implémentations logicielles des traitements.

#### Apparté sur l'industrialisation du dispositif

Sur la base des 2 prototypes laboratoire (le dôme version 1 et la sphère d'acquisition MeSurA), un dispositif reprenant l'architecture générale du dôme version 1 a été réalisé par la société OPTO à destination des centres techniques (CETEHOR et CETIM-CTDEC) qui sont associés au projet MeSurA. Ce dispositif pré-industriel (figure 2.1c) a pour vocation d'être mis en œuvre dans les entreprises. La réalisation de ce démonstrateur s'est appuyé sur l'avancement de nos travaux et de nos connaissances pour aboutir à un matériel et un logiciel de pilotage prêts à l'emploi. Cette réalisation par la société OPTO couvre donc exclusivement la réalisation de l'acquisition des données stéréophotométriques. Le traitement des données relève de compétences et de méthodes qui sont au cœur de nos recherches. Ces méthodes sont intégrées dans des logiciels communs développés au sein du Laboratoire SYMME sur lesquels nous reviendrons dans la section 2.3.

### 2.2.2 Sphère MeSurA

L'architecture choisie est représentée dans la figure 2.4. Le dispositif MeSurA est constitué de deux dômes opaques pour isoler de la lumière extérieure. Les deux réunis forment une sphère complète sur laquelle sont disposés 112 modules d'éclairage et 4 caméras (+ un emplacement supplémentaire). Deux caméras CCD sont placés pour inspecter la face inférieure et supérieures du produit et les trois autres emplacements sont dédiées à l'inspection des faces latérales. Elles sont séparées chacune d'un angle azimuthal de  $120^\circ$  et élevées d'un angle d'environ  $15^\circ$ . Les pièces à inspecter sont posées au centre de la sphère sur une vitre de fine épaisseur traitée anti-reflet pour limiter les réflexions indésirables, à la manière des couches déposées sur les verres de lunette. Une meilleure transmissibilité de la lumière est essentielle pour ne pas perturber le chemin de la lumière et par voie de conséquence les données de l'acquisition RTI. Pour un lot de pièces, il est possible de réaliser un support avec de fines tiges en carbone s'adaptant à la forme du produit pour le maintenir au centre de la sphère sans l'assistance de la vitre qui peut être une source de perturbation. Ce système multi-caméra permet d'enrichir les informations liées à la discrétisation de la BRDF en terme d'angle d'observation par rapport à un système RTI classique, il permet notamment l'inspection de pièces plus complexes que des surfaces de produits plats.

## 112 modules d'éclairage

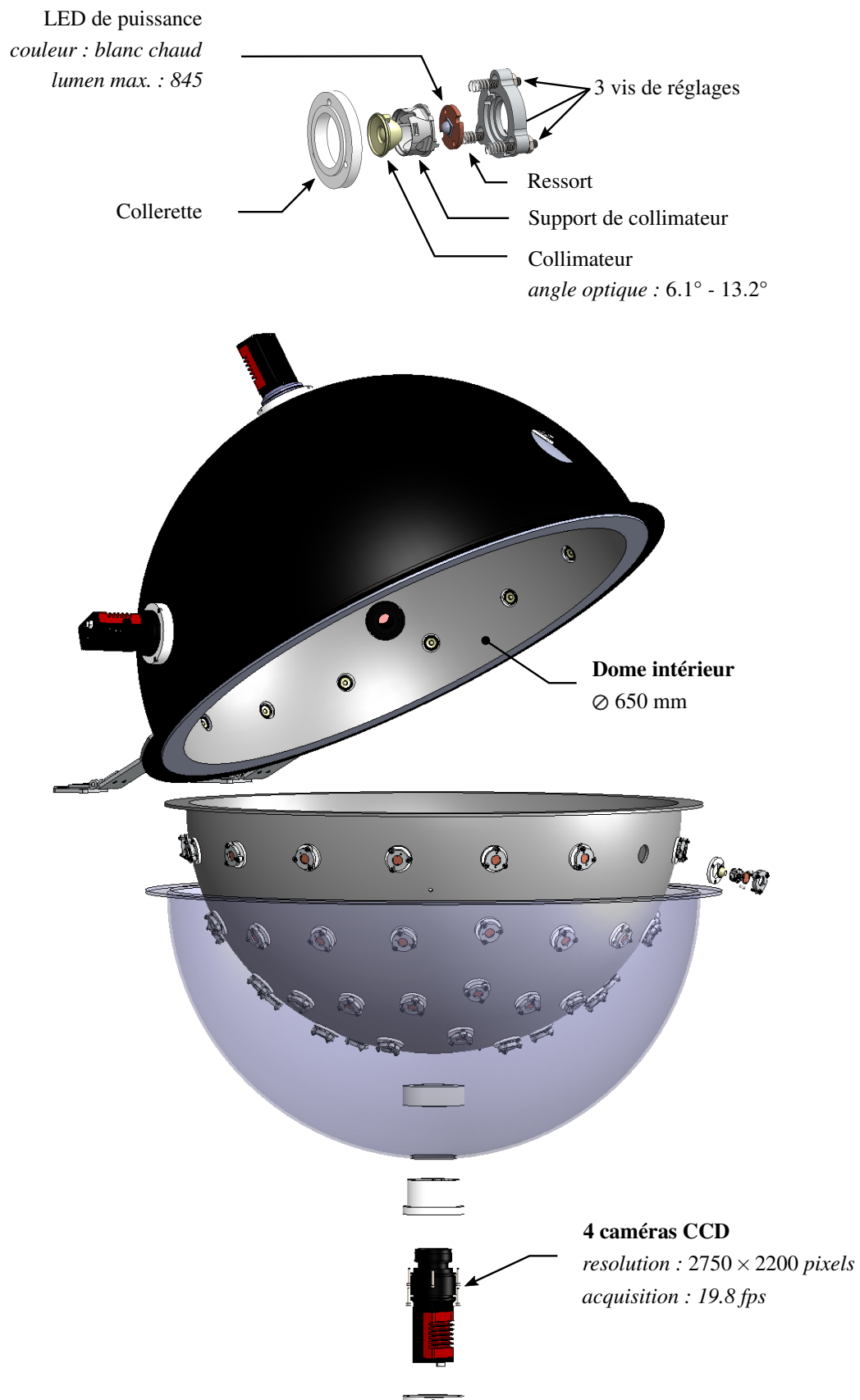


FIGURE 2.4 – Sphère d'acquisition MeSurA



Avant d'aborder plus spécifiquement les améliorations liées à l'instrumentation du dispositif, on rappelle le principe général de l'acquisition RTI à l'aide de la figure 2.5. Seule la caméra du dessus est représentée sur le schéma avec sa demi-sphère correspondante d'éclairage délimitée en rouge. L'obtention des données stéréophotométriques est similaire pour les autres points de vue, seule la demi-sphère d'éclairage considérée change. Des éclairages peuvent être partagés par plusieurs caméras. L'échantillon d'application est un anneau teinté qui fera l'objet d'une présentation et d'une analyse plus détaillée dans le chapitre 3. Considérons donc la caméra 1, celle-ci réalise une photographie de l'objet inspecté pour chaque direction d'éclairage de l'hémisphère supérieur, noté  $\mathcal{H}^{2+}$ . L'empilement des images obtenues forme une matrice virtuelle 3D de pixel. Si on considère maintenant un pixel quelconque dans le plan  $(u, v)$  de l'image, celui-ci prend  $m_1$  valeurs de niveaux de gris (luminances) en fonction de la direction d'éclairage utilisée pour éclairer la surface, où  $m_1 = 56$  correspond au nombre d'éclairages associés à la caméra du dessus. Le comportement de ce pixel peut alors être représenté dans le repère  $(l_u, l_v, \mathcal{G})$  qui forme un nuage de luminances mesurées. L'approximation continue de ce nuage de valeurs pour chaque pixel de l'image est ensuite réalisée par un modèle d'approximation de forme (PTM, HSH ou DMD).

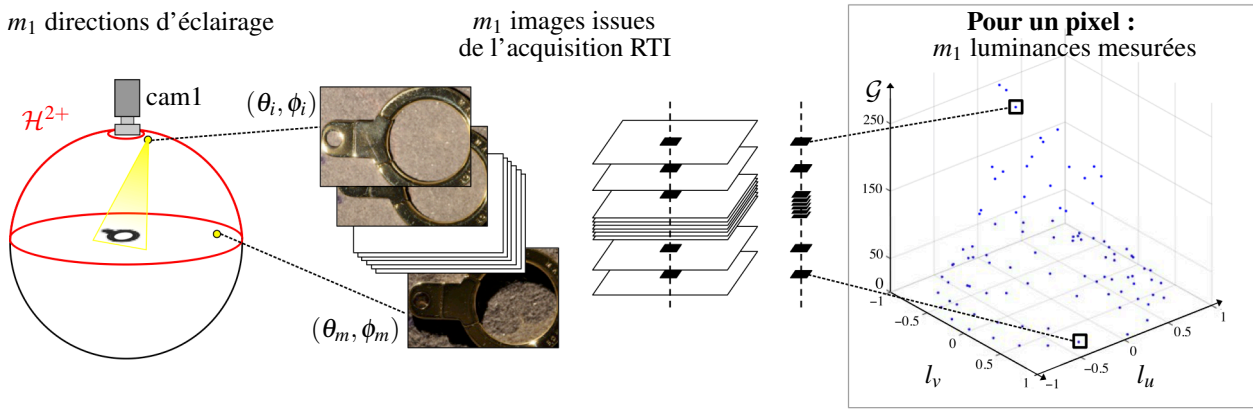


FIGURE 2.5 – Principe de l'acquisition des données stéréophotométriques RTI

Les solutions retenues pour la conception de la Sphère MeSurA portent principalement sur le choix du système de prises de vue, le choix des éclairages et l'électronique de commande. Les solutions retenues sont détaillées ci-dessous.

#### (a) *Discrétisation de la mesure RTI*

Lorsqu'on conçoit un dispositif d'acquisition RTI, la question du choix de la discrétisation de la mesure se pose. En pratique, cela consiste à déterminer le nombre d'éclairage, leur répartition et également les directions d'observation qui seront nécessaires à l'analyse des objets inspectés. Les publications traitant des méthodes RTI fournissent peu d'élément de réponse à cette problématique qui dépend des applications et des caractéristiques recherchées sur la surface. Quelques considérations sur cet aspect de la conception des dispositifs d'acquisition sont abordés ici. Les expérimentations réalisées montrent que la discrétisation induite par un dispositif d'acquisition RTI peut générer une perte d'information dans certains cas et conduire à la non-détection d'une anomalie d'aspect ou d'une micro-géométrie particulière. L'essentiel est de disposer d'un réseau suffisamment dense de sources d'illumination qui doivent être réparties de façon uniforme. L'évolution des maillages des sources lumineuses est synthétisée dans la figure 2.6, respectivement associés aux dispositifs d'acquisition RTI de la figure 2.1. Pour les deux prototypes labo, le choix du maillage a été guidé par des contraintes (qui ne sont actuellement plus d'usage) en lien avec le calcul de la Décomposition Modale Discrète sur lequel nous reviendrons en détail dans le chapitre 3. Le maillage des sources lumineuses

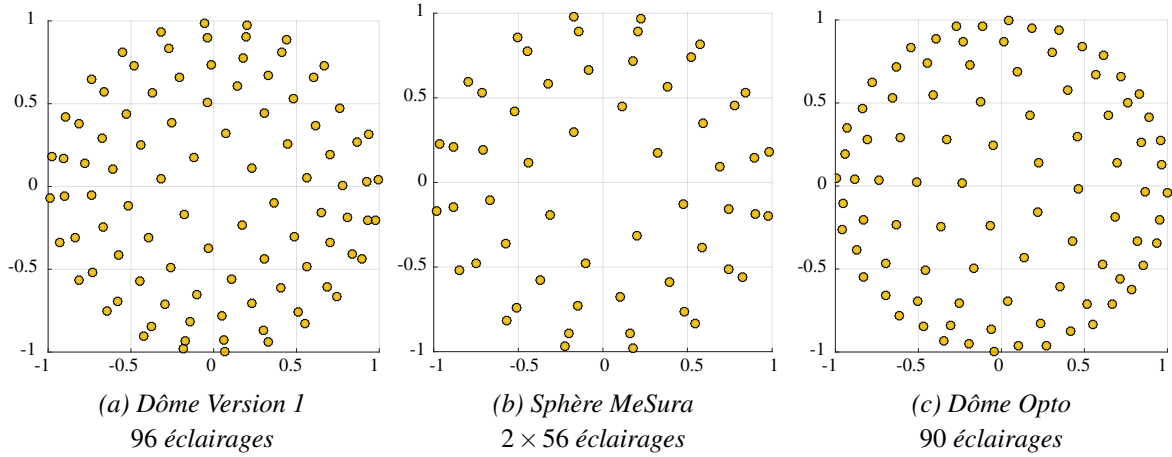


FIGURE 2.6 – Répartition des sources lumineuses

a été fixé selon une grille de points identique au maillage quadrangle du modèle éléments finis utilisée pour construire la base modale à partir de l'élément géométrique nominale (une demi-sphère). Cette préconisation n'est cependant plus nécessaire pour garantir la qualité de construction en lien avec le calcul de la Décomposition Modale Discrète. L'autre approche prise utilise un principe souvent mis en œuvre pour la réalisation des architectures géodésiques. Il s'agit de réaliser une sphère en assemblant uniquement des triangles équilatéraux identiques. L'opération consiste à construire un icosaèdre formé de 20 faces triangulaires équilatérales identiques avec 12 sommets et 30 côtés. Les triangles équilatéraux sont ensuite subdivisés en triangles équilatéraux plus petits, en divisant chaque côté en un nombre entier de parties égales. Plus le nombre de triangle augmente, plus la forme est proche de la sphère circonscrite. En fonction de la segmentation effectuée, on dit qu'on est à la fréquence  $f_r = 1, 2, 3, \dots$  comme illustrée dans la figure 2.7. Comme les nouveaux triangles sont situés en-dehors de la sphère, il est nécessaire de projeter les sommets des nouveaux triangles sur la sphère de diamètre choisi. La fréquence sera déterminée en fonction du nombre de sources lumineuses retenu. Le nombre d'éclairages détermine le nombre de valeurs discrètes de luminance acquises par le dispositif. Si on considère les paramétrages PTM et HSH, le nombre de valeurs discrètes (lu-

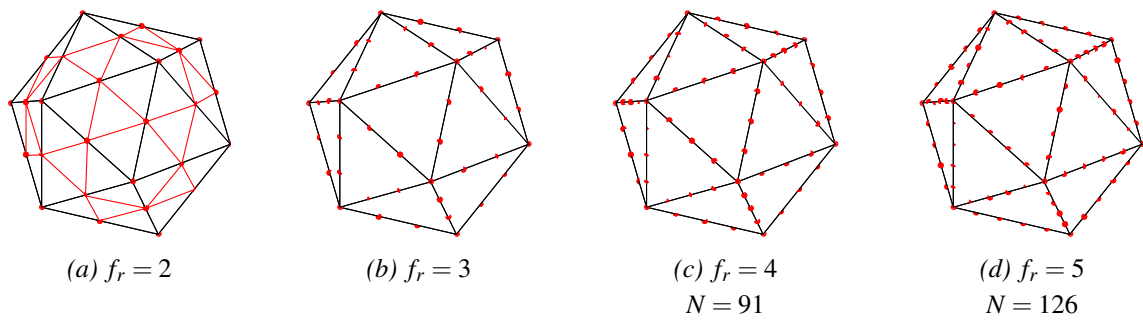


FIGURE 2.7 – Subdivision d'un icosaèdre

minances) décrivant la réflexion lumineuse à un point (pixel) de la surface aura globalement peu d'influence sur la qualité du rendu, car la complexité des géométries de réflexion accessibles en combinant les formes élémentaires de ces approches est réduite. Autrement dit, augmenter le nombre d'éclairage devient rapidement limité en vue d'améliorer le rendu RTI dans ces cas. A l'inverse, l'intérêt de densifier le maillage est évident lorsqu'on peut approcher finement les variations des luminances mesurées grâce à la mise en œuvre d'une méthode performante d'approximation de forme, à l'instar de la Décomposition Modale Discrète.



FIGURE 2.8 – *Echantillons industriels du projet MeSurA***(b) Système de prises de vue**

Sur le dôme version 1, il avait été choisi d'utiliser un Appareil Photographique Numérique (APN) équipé d'un objectif macro. Il s'agit du Nikon D300s. Des caméras HD sont utilisées pour la sphère d'acquisition MeSurA car elles sont mieux adaptées aux cadences d'acquisition relatives à un usage industriel. La taille du capteur et les caractéristiques de l'objectif ont été fixées pour obtenir une image que l'œil acceptera comme nette de la zone de l'espace dans laquelle doit se trouver l'échantillon à inspecter. L'étendue de cette zone a été définie en tenant compte des cotations maximales des produits (figure 2.8) venant des partenaires du projet MeSurA, sur lesquels le contrôle et particulièrement la détection des anomalies d'aspect représentent un enjeu industriel important. Ce volume de netteté correspond à un cube de 5cm de côté. Ainsi, les deux seuls paramètres restant à disposition de l'utilisateur pour régler la profondeur de champ sont l'ouverture du diaphragme et la taille de la surface sensible (capteur). Nous veillons à maintenir la profondeur de champ la plus grande possible pour examiner une grande variété d'objets, nous affranchissant ainsi d'une opération de mise au point qui peut rapidement devenir fastidieuse et contraignante. Le résumé des caractéristiques des caméras et des optiques est fourni dans le tableau 2.1.

Caméra		Objectif	
Fabricant	AVT	Fabricant	Shneider
Modèle	Prosilica GT2750	Modèle	Xenon-Emerald
Capteur	Sony ICX694 CCD	Ouverture	2.2
Résolution	2750 × 2200	Longueur focale	51.2mm
Max. fps	19.8		

TABLE 2.1 – *Principales caractéristiques des caméras et des optiques de la Sphère d'acquisition MeSurA*

Les quatre caméras sont connectées par des signaux de commande d'entrée/sortie afin de synchroniser leurs prises de vue. La caméra joue le rôle de maître, autrement dit elle donne sa cadence aux autres caméras. Pour répondre aux besoins exigeants des entreprises en terme de temps de cycle, nous avons également opté pour une interface standard GigE Vision (Gigabit-Ethernet for Machine Vision) qui fournit un cadre performant pour la transmission des images. L'éthernet Gigabit offre un débit maximal de 1000 Mbps ou 1 gigabit par seconde (Gbps), cette dernière génération du protocole Ethernet fournit un moyen fiable de transmettre des données image en provenance de caméras de vision industrielle. Outre un taux de transfert intéressant, le matériel utilisé devient interchangeable car le standard vise à définir un protocole universel

de communication permettant d'utiliser un logiciel non tributaire des appareils. Cela n'était pas le cas de l'appareil Nikon D300s.

### (c) *Sources lumineuses*

L'usage des LEDs de puissance permet d'obtenir une forte luminosité pour avoir un temps de cycle rapide. En effet, plus la luminosité à l'intérieur de la sphère est forte, plus le temps d'ouverture pourra être court. De la même façon, plus la luminosité est forte, plus le diaphragme peut être fermé pour accéder à une grande profondeur de champ. La quantité de lumière émise par une source lumineuse (en lumens lm) doit être le plus élevée possible pour obtenir des images nettes en suivant la cadence de 19 images/sec de la caméra. Le spectre proche de la lumière naturelle est dicté par la pratique des experts visuels. Un encombrement faible, une longue durée de vie, un coût modéré sont autant d'autres avantages. Notre choix s'est porté sur une LED de la marque *Cree*, de couleur « blanc chaud » (Warm white : 2600 - 3700 K), le modèle XM-L choisi accepte un courant maximal de 3000 mA et peut délivrer 1000 lumens. Pour donner un ordre de grandeur, la quantité de lumière émise par un phare de voiture est environ de 1200 lumens.

Le processus de fabrication des LEDs de puissance s'est amélioré ces dernières années, principalement sur l'optimisation de la température de couleur proximale. L'amélioration du procédé de déposition du luminophore permet de générer des photons de manière homogène sur toute la surface émissive du semi-conducteur. La mise en œuvre des techniques RTI nécessite l'étalonnage des sources lumineuses. La procédure proposée est divisée en deux étapes. La première étape consiste à faire coïncider le centre du dispositif et le maximum de l'éclairement associé au faisceau lumineux de chacune des LEDs. L'incertitude sur les *directions* d'éclairage (à ne pas confondre avec les *positions* d'éclairage) est souvent omise dans le contrôle du processus de mesure RTI. La seconde est de repérer la position relative des sources lumineuses par rapport au moyen de prises de vue. Pour la Sphère MeSurA, il est nécessaire de concevoir le fichier LP (*Light positions* associé à chaque caméra pour pouvoir réaliser les approximations continues RTI, à partir des données discrètes issues de l'acquisition stéréophotométrique.

Les LEDs sont montées sur des supports réglables. Une vue éclatée des modules d'éclairage est donnée dans la figure 2.4. La collerette désigne la partie qui vient se coller sur les bordures des trous prévus aux emplacements des modules d'éclairage sur la sphère. Cette partie fixe est reliée par 3 vis de réglage à la partie mobile dans laquelle la LED, le collimateur et le support sont encapsulés. On peut ainsi venir modifier l'axe optique de l'éclairage en jouant sur les 3 degrés de liberté afin de faire coïncider le faisceau lumineux de chaque LED avec le centre de la sphère. Le rôle du collimateur comme sa désignation l'indique est de réduire l'angle du faisceau, en concentrant les rayons lumineux émis sur la zone d'intérêt.

### (c) *Electronique de pilotage*

Le principe du chenillard consiste à allumer les LEDs l'une après l'autre de façon automatique, au rythme de la prise d'image des caméras qui est fixée en nombre d'images par seconde (FPS). Le dôme version 1 est piloté par un matériel d'entrées/sorties numériques Labview afin d'avoir un maximum de flexibilité pour la programmation du chenillard et du pilotage de l'APN. Nous avons souhaité pour la sphère d'acquisition MeSurA aller vers une solution qui n'est pas dépendante du matériel et de l'environnement de développement graphique de National Instruments. Une grande partie de la réalisation a donc été consacrée au développement d'un montage électronique afin de synchroniser le chenillard de LEDs et les prises de vue réalisées par les caméras. Nous en donnons le principe générale. Une version réduite du schéma électronique est donnée dans la figure 2.9 qui correspond à l'allumage consécutif des 15 premières LEDs. Le circuit se poursuit à l'identique vers le bas de la figure pour le restant des éclairages. Le montage du chenillard de LEDs est réalisé à l'aide de circuits CMOS très répandus : le Compteur Décimal 4017. Le CD4017 possède une entrée d'horloge *CLK* et dix sorties distinctes notées de 0 à 9, dont une seule peut être

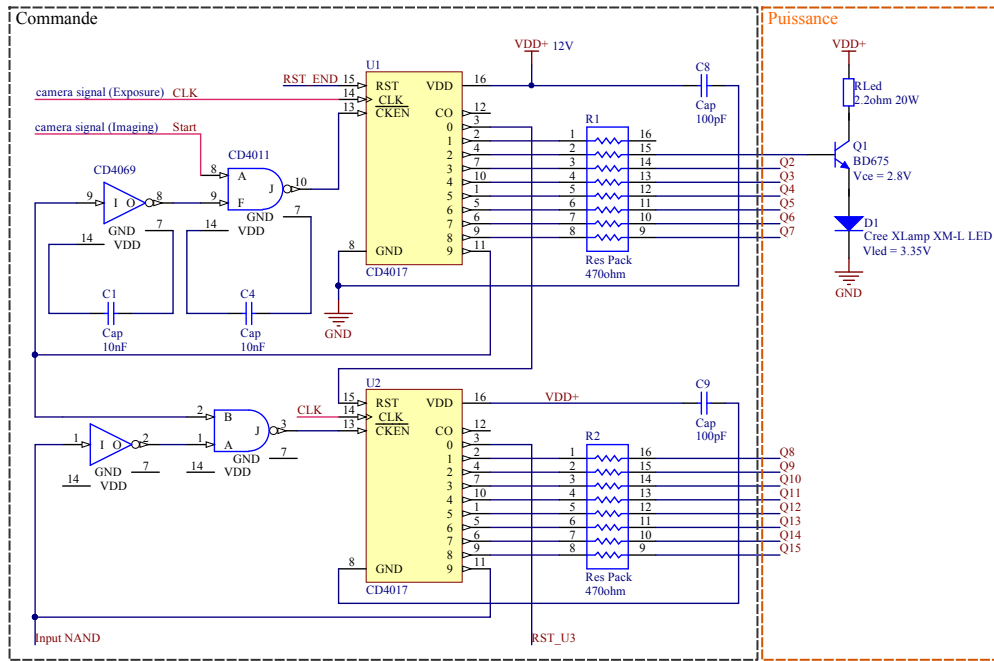


FIGURE 2.9 – *Chenillard de LEDs*

active à un instant donné. Il est possible de mettre plusieurs CD4017 en cascade afin d'augmenter le nombre de sorties. Les sorties sont donc activées séquentiellement, c'est à dire l'une après l'autre, à chaque nouvelle impulsion d'entrée d'horloge. Les entrées d'horloge des compteurs sont connectées au signal d'exposition de la caméra 1 qui joue le rôle de maître. Le signal d'exposition est à l'état haut pendant tout l'intervalle de temps où celle-ci laisse passer la lumière lors d'une prise de vue. Le signal « Imaging » correspondant à l'intervalle entre le début et la fin de la séquence d'images est utilisé pour activer le premier compteur ce qui a pour effet de démarrer le chenillard. L'intensité des signaux de sortie du compteur (quelques mA) ne suffisent pas à alimenter les LEDs de puissance du dispositif d'acquisition. Pour commuter un courant plus important, un étage électronique supplémentaire est nécessaire. Cette interface entre l'électronique de commande que nous venons de décrire et l'électronique de puissance permettant d'alimenter les sources lumineuses est réalisée en utilisant des transistors de type Darlington, c'est à dire qu'ils possèdent un très grand gain, qui les rendent aptes à commuter un courant important. Les transistors sont notés de  $Q_1$  à  $Q_{15}$  sur le schéma, seul le premier transistor est représenté avec une des LEDs du dispositif qui lui est associée. Les transistors fonctionnent en saturation, le courant maximal est fixé par la résistance de puissance  $R_{led}$  qui détermine le courant traversant dans les LEDs. Ce courant ne doit pas dépasser la valeur de 3A donnée par le fabricant de la LED. Les valeurs caractéristiques de la LED sont données dans les documentations techniques des composants. La résistance normalisée de valeur supérieure est choisie afin d'assurer une marge de sécurité vis-à-vis des détériorations que pourraient subir les LEDs à cause de fluctuations non désirées.

Finalement, l'ensemble de ces solutions techniques retenues répond au cahier des charges fixé en réalisant les 112 prises de vues pour les quatre points de vue, soit un total de 448 images, en moins de 10 secondes. Chaque lot de 112 images par caméra est ensuite réduit en sélectionnant uniquement les images associées aux directions d'éclairage de leur dôme correspondant.

### 2.2.3 Etalonnage et maîtrise des incertitudes

L'étalonnage (*calibration* en anglais) désigne « l'ensemble des opérations qui établissent, dans des conditions données, la relation entre les valeurs indiquées par l'instrument ou le système de mesure, et les valeurs correspondantes réalisées par un étalon ». Dans le cas des techniques optiques RTI, il faut se poser la question de la nécessité de l'étalonnage. Pour des mesures dimensionnelles reliées au mètre, on peut vouloir effectivement réaliser un étalonnage à partir du moment où on introduit sous un dispositif RTI un objet dont on connaît les dimensions. Une fonctionnalité d'étalonnage a été implémentée sur le logiciel de visualisation *MsaTool*<sup>®</sup> présenté dans la section 2.3.2 pour spécifier l'échelle qui est le rapport entre la mesure de l'objet réel et la mesure de sa représentation virtuelle. Il faut cependant séparer l'identification de paramètre dimensionnel (géométrique) de celle des paramètres du modèle liés à la mesure de l'aspect des surfaces. L'aspect est une grandeur caractérisée par la BRDF car le mesurande est codé dans la variation spatiale de la luminance réfléchie par la surface. Le mesurande est par conséquent indépendant de l'étalon métrique. La comparaison avec un étalon peut être effectuée soit au moyen d'un instrument référence de type goniospectrophotomètre, soit avec des surfaces de référence où la distribution angulaire de la lumière réfléchie à la surface est connue. Le développement des procédures de mesures et des étalons afin d'aller vers une réelle métrologie appliquée pour les attributs de l'apparence visuelle font actuellement l'objet de travaux dans un projet de recherche nommé *xD Reflect*<sup>1</sup> (Réflectométrie Multidimensionnelle pour l'industrie) qui associe des Instituts Nationaux de Métrologie, des industries, et des universités, appartenant à la communauté européenne. L'objectif de ce projet est de développer des méthodes de mesures optiques qui sont traçables au système international (SI), et qui permettent de décrire complètement l'apparence des surfaces. Cependant, le projet s'attache en pratique à l'étude d'artéfacts dont les propriétés visuelles sont le goniochromatisme (surfaces dont la couleur varie avec l'angle d'observation), le brillant, et la fluorescence afin de fournir des grandeurs en lien avec l'appréciation visuelle de ces surfaces et de définir des étalons pour le contrôle qualité des industries. Les procédures qui vont sortir de ce projet sont donc destinées à maîtriser l'aspect globale d'une surface.

Des surfaces blanches (*Spectralon*<sup>®</sup> *Labsphere*<sup>2</sup>) peuvent par exemple servir de référence pour les mesures du facteur de réflexion diffuse. Leur facteur de réflexion est supérieur à 94% pour les longueurs d'onde du visible, ce qui signifie qu'elle renvoie par diffusion toute la lumière qu'elle reçoit. Ainsi, si on mesure, sur le Spectralon l'évolution de la luminance dans une direction donnée en fonction de l'angle de l'illumination, nous pourrions à l'aide de la relation  $L = E/\pi$  retrouver l'évolution de l'éclairement. Retrouver l'éclairement peut permettre de corriger les écarts dus à des variations d'éclairement de la surface qui peuvent induire à la reconstruction des variations d'aspect qui ne sont pas liées aux propriétés intrinsèques de la surface mais aux sources d'éclairage. Nous allons voir les étapes liées à la procédure d'étalonnage des positions des sources lumineuses et les directions d'éclairage qui sont deux problématiques distinctes.

#### Direction d'éclairage

Le rayonnement émis par une LED de puissance n'est pas homogène autour de sa direction optique. La connaissance précise de la distribution dépendant de l'angle de rayonnement est nécessaire pour certaines applications. Le diagramme associé au modèle de LEDs est donc fourni dans les documentations techniques des fabricants de LED, le modèle des LEDs correspondant à ceux montés sur la Sphère MeSura est représenté dans la figure 2.10.

1. xD Reflect : <http://www.xdreflect.eu/summary/summary-french/>

2. Spectralon<sup>®</sup> Labsphere : <https://www.labsphere.com>

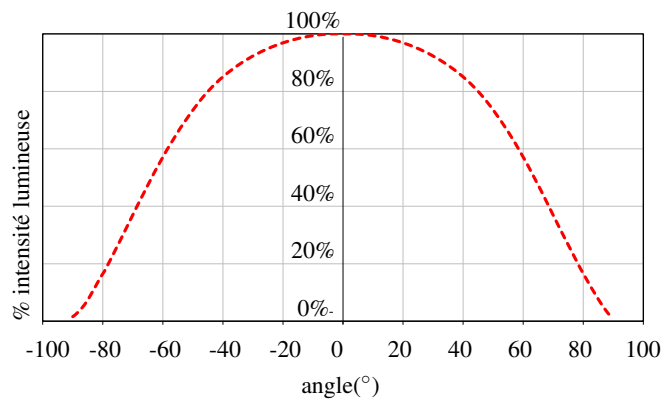


FIGURE 2.10 – Diagramme de la répartition angulaire de l'intensité émise par une LED

Une conséquence de la dispersion du faisceau lumineux nous amène à proposer des solutions pour aligner le maximum du faisceau de chaque LED avec le centre du dispositif d'acquisition où sera positionné l'échantillon. Il est intéressant de voir le processus de mesure du diagramme de la répartition lumineuse tel qu'il est défini dans les recommandations de la C.I.E [CIE 07]. Il consiste à utiliser un capteur CCD pour obtenir une image du profil de rayonnement avec un minimum de 10 points de mesures de chaque côté du maximum du faisceau. Le système optique proposé contient des optiques grossissantes variables qui sont conçus pour faciliter l'observation des profils d'éclairement transversaux de manière à occuper environ un quart de la hauteur du récepteur photosensible du capteur. D'autres composants sont inclus dans le système pour atténuer la puissance du faisceau et éviter la saturation du capteur d'une part et d'autre part pour fournir un étalonnage spatial de la matrice de pixels du capteur. La réalisation de cet étalonnage se fait sur un banc optique afin de maîtriser le réglage précis des éléments optiques du système. La procédure décrite dans le rapport technique pour étalonner les LEDs ne convient pas dans notre cas car les éléments optiques intercalés entre la LED et le capteur CCD peuvent induire une déviation du faisceau lumineux et donc de la position du maximum. Notre objectif n'est pas de déterminer une valeur vraie le mieux possible de l'intensité lumineuse émise par la source d'éclairage, mais seulement d'identifier le maximum de la répartition. L'ajustement des LEDs est donc réalisé à l'aide des vis de réglage de chaque module afin d'orienter la direction du faisceau. Le principe général consiste à vérifier visuellement que l'ellipse lumineuse formée par les sources d'éclairage sur le plan horizontal d'un support opaque placé au centre la sphère soit toujours centré sur le même point qui correspond au centre du dispositif. Cette opération est réalisée une unique fois à l'assemblage. Toutefois, cette procédure fastidieuse peut dans certains cas être facilitée et rendue plus fiable en localisant la position du maximum d'éclairement automatiquement soit en repérant le maximum de l'ellipse, il est alors nécessaire de disposer d'un objectif grand angle (de type *fisheye*) pour pouvoir localiser dans une image l'ellipse entière et ajuster plus précisément l'orientation des sources. Une autre approche consiste à positionner un capteur CCD au centre de la sphère pour observer la répartition de la luminance sur la surface du capteur de façon analogue à la technique de mesures des LEDs.

### Positions d'éclairage (*Light Position*)

Le calcul des positions d'éclairage est réalisé à l'aide des jeux d'acquisition d'une sphère d'étalonnage placée au centre du dispositif. La figure 2.11b représente la fusion des 56 images d'une acquisition RTI de la sphère d'étalonnage vue par la caméra de dessus.

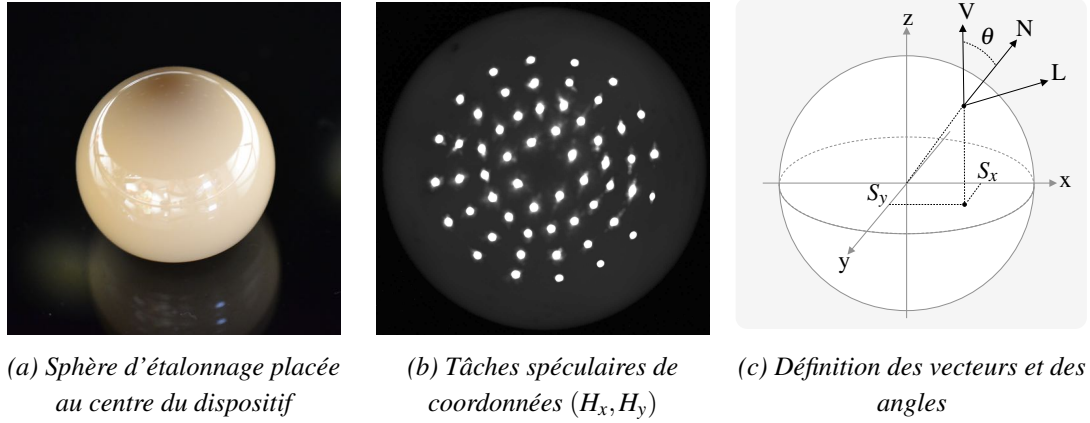


FIGURE 2.11 – Calcul des positions d'éclairage (Light Position)

Une durée courte d'exposition est nécessaire afin d'observer à la surface de la sphère des tâches spéculaires, en s'assurant par ailleurs de pouvoir discerner le contour de la pièce. Les tâches spéculaires observées à la surface de la sphère d'étalonnage correspondent à des positions sur le dôme d'éclairage. Les tâches spéculaires sont les reflets des LEDs sur la surface réfléchissante de la sphère d'étalonnage, elles ne fournissent donc aucune information sur l'orientation du faisceau de chacune des LEDs qui a une influence importante sur l'éclairage des échantillons inspectés. Cette procédure d'estimation des positions des éclairages permet donc seulement de remonter à la position des LEDs. La direction d'éclairage dans cette section désigne la direction dans laquelle se trouve le point d'origine de la source d'éclairage. Pour retrouver la direction d'éclairage des sources lumineuses, nous utilisons la géométrie de la sphère et nous supposons que la réflexion obéit à la loi de Lambert. La figure 2.11c reprend l'approche proposée dans [Drew 12] pour calculer la direction d'éclairage d'une source  $L$  (à ne pas confondre avec le terme de luminance). La méthode utilise les coordonnées de la tâche spéculaire  $(H_x, H_y)$ , le centre de la sphère d'étalonnage  $(C_x, C_y)$  et le rayon  $r$  de la sphère d'étalonnage mesurés en pixels sur l'image. Les positions des sources lumineuses par rapport au centre de la sphère d'étalonnage sont normalisées pour être comprises entre  $[-1,1]$  en calculant :

$$S_x = \frac{H_x - C_x}{r} \quad S_y = \frac{H_y - C_y}{r} \quad (2.1)$$

L'expression du vecteur unitaire normale à la surface est donnée par :

$$(S_x, S_y, \sqrt{1 - S_x^2 - S_y^2}) \quad (2.2)$$

L'angle de co-latitude correspondant  $\theta_N$  est obtenu par :

$$\theta_N = \arccos(\sqrt{1 - S_x^2 - S_y^2}) \quad (2.3)$$

En accord avec les lois de Snell-Descartes et de Fresnel, on peut affirmer que l'angle  $(\vec{L}, \vec{N})$  est le même que l'angle  $(\vec{N}, \vec{V})$ . Par conséquent, on en déduit facilement l'angle de co-latitude  $\phi_L$  associé à la direction d'éclairage :

$$\theta_L = 2 \arccos \sqrt{1 - S_x^2 - S_y^2} \quad (2.4)$$

On peut également montrer que les vecteurs  $\vec{L}$ ,  $\vec{N}$  et  $\vec{V}$  sont coplanaires, ce qui nous permet d'obtenir l'angle de co-latitude. Pour  $y > 0$ , l'autre angle (azimut) de la source d'illumination dans le système de coordonnée sphérique est alors donné par :

$$\phi_L = \arcsin(y / \sin \theta_L) \quad (2.5)$$



La direction d'illumination est définie par le vecteur résultant :

$$(\sin \phi_L \times \cos(\theta_L), \sin \phi_L \times \sin(\theta_L), \cos(\phi_L)) \quad (2.6)$$

A partir du lot d'images d'une sphère, nous pouvons donc remonter aux positions d'éclairage. La procédure est automatisée sous la forme d'un programme qui détecte le contour de la sphère d'étalonnage dans l'image et repère les centres des tâches spéculaires nécessaires au calcul des positions d'illumination. Les résultats sont ensuite enregistrés dans un fichier d'extension *\*.lp* (*Light Position*). L'opération est répétée pour les autres caméras. Il n'est bien sûr pas nécessaire de refaire cet étalonnage des positions d'éclairage à chaque nouvelle acquisition d'un échantillon. La procédure doit être effectuée dans le cas d'une manipulation de la caméra, d'un changement d'objectif, ou d'autres modifications qui viennent changer les conditions angulaires d'observation et d'illumination.

La maîtrise des directions d'éclairage s'insère dans une méthodologie globale destinée à établir les spécifications du dispositif et à proposer une procédure d'étalonnage raisonnable de ces éléments constitutifs. Une autre étape dans la définition des spécifications est d'évaluer ces dispositifs en participant à des mesures de comparaison, c'est une pratique courante pour un laboratoire de mesure.

#### 2.2.4 Répétabilité, reproductibilité et stabilité

Dans le but d'estimer la répétabilité de mesure du dispositif, nous réalisons trente acquisitions d'un même échantillon dans des conditions identiques (réglage caméra, temps d'exposition, etc). La métrique classique utilisée pour comparer deux images est le PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) qui est défini comme le rapport entre la puissance maximale du signal et la puissance du bruit qui affecte la fidélité de la représentation. Le PSNR d'une image  $X$  par rapport à une image  $Y$  est défini en échelle logarithmique des décibels (dB) par la relation suivante :

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}} \quad (2.7)$$

où MSE est l'erreur quadratique moyenne (MSE pour Mean Square Error) :

$$\text{MSE} = \frac{1}{U \times V} \sum_{u,v} (X(u,v) - Y(u,v))^2 \quad (2.8)$$

Nous réalisons plusieurs fois la mesure de la sphère d'étalonnage, exactement dans les mêmes conditions, afin d'estimer les écarts de mesure uniquement dus aux causes communes du processus de mesure du dispositif MeSurA. L'analyse statistique consiste à calculer les  $m \times C_{30}^2$  valeurs de PSNR, où  $m$  correspond au nombre de directions d'incidence d'éclairage, et  $C_{30}^2 = 435$  au nombre de combinaisons de PSNR qu'il est possible de calculer à partir des 30 images obtenues pour chacune des directions d'incidence d'éclairage du dispositif. Soit un total de 24360 valeurs de PSNR en considérant uniquement la caméra du dessus ( $m_1 = 56$  éclairages). La synthèse des résultats est donnée dans la figure 2.12. Une valeur de PSNR inférieure à 30dB traduit généralement une image présentant des dégradations perceptibles. Les médianes des valeurs PSNR obtenues dans les directions d'éclairage (figures 2.12a) sont toutes supérieures à 46dB, ce qui indique la capacité du système à reproduire les mêmes images dans les mêmes conditions d'acquisition. Les résultats valident le bon fonctionnement de l'électronique de commande qui assure la synchronisation du chenillard de LEDs avec la prise d'images des caméras. La moyenne des écarts-types représentés dans la figure 2.12b donne une valeur de 0.13dB ce qui traduit que les valeurs de PSNR ne sont pas dispersées, et par conséquent que les mesures sont répétables. Dans le souci d'une démarche métrologique complète, il conviendra d'évaluer d'une part la répétabilité de mesures des autres caméras en appliquant la même procédure, et d'autre part la reproductibilité interne, c'est-à-dire si la mesure est applicable par des opérateurs différents, à des moments différents, tout en obtenant des résultats similaires. L'évaluation de la

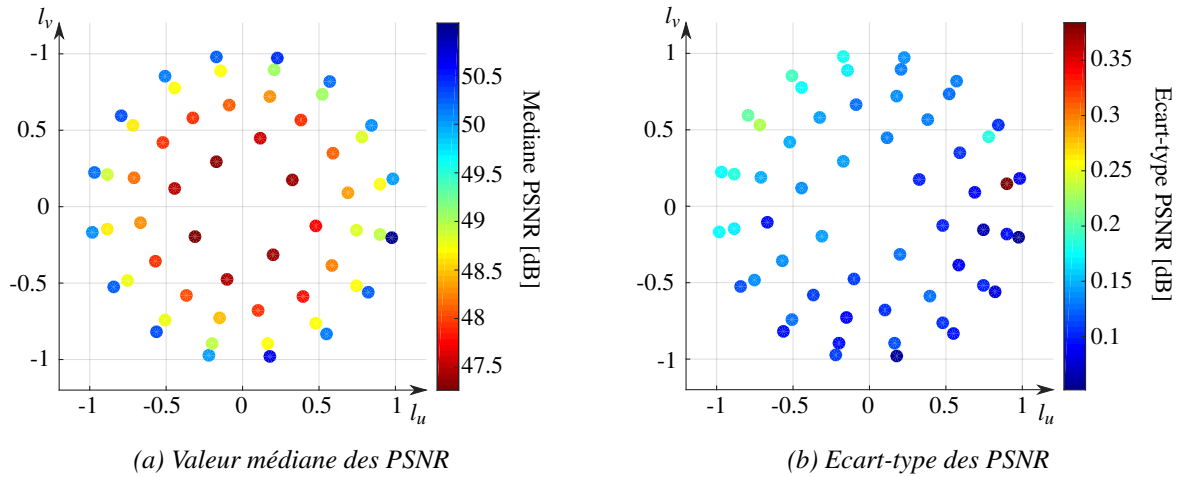


FIGURE 2.12 – Evaluation de la répétabilité du dispositif MeSurA (camera 1 uniquement) : synthèse des 435 valeurs de PSNR obtenues pour chacune des directions d'éclairage

reproductibilité ne peut cependant pas être estimée en calculant le PSNR des images obtenues suite à une expérimentation de ce type car on aura perdu la cohérence spatiale de l'objet dans l'image suite au positionnement de la pièce par l'opérateur sous le dispositif d'acquisition. La mesure d'une différence pixel à pixel n'aboutirait à rien de concluant. La proposition qui est faite est de réaliser cette mesure de reproductibilité sur des cartographies obtenues ultérieurement après traitement des données, puis d'évaluer la présence ou l'absence des mêmes caractéristiques sur la surface de l'échantillon (une ou plusieurs anomalies d'aspect préalablement identifiées, par exemple). De la même façon, on peut aussi vouloir surveiller par *redondance* métrologique. Il s'agit de mesurer une même surface à l'aide des différents équipements pouvant être différents, à l'instar des dispositifs RTI décrits précédemment. Ce contrôle croisé permettra ainsi de détecter la dérive ou la non-conformité d'un équipement de mesure.

Nous avons proposé un test de répétabilité et de reproductibilité afin de quantifier la variabilité créée par le dispositif de mesure. Une fois mesurée, cette variabilité doit, soit être maintenue si elle est acceptable, soit diminuée si elle est trop importante pour obtenir un contrôle fiable. De fait, cela demande une vérification rigoureuse et permanente des dispositifs. Les cartographies représentées dans le système polaire peuvent être vue comme des feuilles de relevé qualité qui pourront être calculées régulièrement dans le temps afin d'identifier le moment où apparaît une cause particulière de variation, par exemple sur une source d'éclairage, entraînant une altération des données. Cet outil de visualisation du processus dans le temps et de mise en évidence de sa stabilité (surveillance des causes spéciales) pourra permettre un réglage opportun du processus de mesure. La démarche proposée contribue à évaluer globalement la stabilité du système. Si cette dernière est satisfaisante, on peut réaliser l'évaluation de l'aptitude du procédé de mesure par les capacités.

### 2.2.5 Capacité

Une question se pose : comment peut-on définir la capacité d'un dispositif RTI ? La réponse n'est pas unique. La capacité est définie comme l'aptitude ou la capacité de l'instrument à satisfaire les spécifications du client. Ce type d'évaluation de l'aptitude du procédé peut être réalisé dans un contexte ponctuel, par exemple, ce que veut le client à l'instant où l'étude est réalisée. Il est alors essentiel de définir les besoins de détection. La détermination de la capacité passe d'abord par la définition de la fonction « détection ».

Prenons comme exemple une application dont l'objectif serait d'identifier automatiquement les anomalies d'aspect par un traitement des données acquises par le dispositif RTI (tel que nous le proposons dans le chapitre 4). Il s'agit alors de montrer la capacité du système (dispositif + méthodes de traitement) à détecter



l'ensemble des anomalies sur le produit. Une comparaison entre ce référentiel et les évaluations réalisées par les sujets peut ensuite être réalisée. Le résultat attendu doit inclure toutes les anomalies identifiées au préalable par le panel d'experts et permettre également la mise en évidence d'anomalies qui échappent au processus d'exploration sensorielle pour démontrer expérimentalement l'intérêt du système. Dans la métrologie dimensionnelle, il est généralement possible de fabriquer un étalon de référence. Dans ce sens, nous avons testé les performances de notre méthode d'identification automatique des anomalies d'aspect sur des échantillons avec des rayures calibrées présentant une topographie particulière (section 4.4.2). Nous avons alors des spécifications de la machine directement en lien avec une micro-géométrie particulière. Cependant cette relation entre les propriétés géométriques intrinsèques à la surface et l'aspect (saillance d'une anomalie par exemple) ne peut pas être généralisée en l'état actuel de nos connaissances car le lien entre la topographie d'une anomalie quelconque et l'aspect est loin d'être trivial.

Ce qui va déterminer qu'une anomalie est détectable ou considérée comme plus apparente, ce n'est pas sa taille, mais sa luminosité. En astronomie, les étoiles sont caractérisées par leur magnitude (grandeur tirée de la luminosité). C'est celle-ci qui détermine si l'étoile sera visible à l'œil nu, et celle-ci que l'on améliore en observant les astres au moyen d'un télescope. Ceci explique pourquoi la détermination d'une taille ou d'une géométrie minimale (taille/extension/profondeur) ne permet pas généralement de définir des spécifications techniques de détection. Il s'agit de prendre en compte les anomalies géométriquement invisible ayant des effets visibles individuellement. Les rayures présentes à la surface de nombreux objets sont souvent géométriquement plus petites que la résolution spatiale de notre œil ou du capteur, pourtant les effets qu'elles induisent lors de leurs interactions avec la lumière sont d'une grande importance et se remarquent relativement facilement en faisant miroiter la surface.

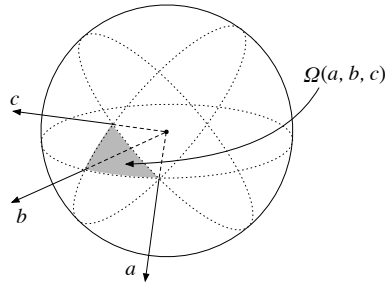
Dès lors, nous proposons de définir la résolution angulaire de l'illumination pour caractériser les performances des systèmes RTI car elle est en réalité un des facteurs les plus influents sur les résultats de détection. En effet, ce sont les angles d'incidence de la lumière qui vont permettre de mettre en évidence une micro-géométrie qui induit un comportement spéculaire dans des configurations d'éclairage particulières et souvent restreintes. Nous proposons alors un classement des techniques RTI en caractérisant le cône angulaire formé par 3 sources lumineuses voisines qui peut être vue comme l'espacement moyen entre les LEDs. Pour calculer l'angle solide sous-tendu par un triangle, nous utilisons l'expression définie par Oosterom et Strackee [Van Oosterom 83]. Considérons un tétraèdre qui a pour origine le centre de la sphère et porté par trois vecteurs dans les directions des sources d'éclairage  $a, b, c \in \mathbb{R}^3$ . L'angle solide  $\Omega(a, b, c)$  formé par le tétraèdre est fonction de ces vecteurs :

$$\tan\left(\frac{1}{2}\Omega(a, b, c)\right) = \frac{[a \ b \ c]}{|a||b||c| + (a \cdot b)|c| + (c \cdot a)|b| + (b \cdot c)|a|} \quad (2.9)$$

où  $[a \ b \ c]$  est le triple produit scalaire de  $a, b$  et  $c$  (égale au déterminant de la matrice  $3 \times 3$  des vecteurs colonne  $a, b$  et  $c$ ). Comme remarqué par Arai [Arai 13],  $\Omega(a, b, c)$  représente également l'aire du triangle sur la sphère unitaire dont les sommets sont à l'intersection des vecteurs  $a, b$  et  $c$ , comme illustré dans la figure 2.13. Arai propose l'algorithme permettant de calculer l'angle solide à partir de l'équation 2.9. Nous appliquons ce calcul à l'ensemble des tétraèdres qui relient les sources lumineuses voisines. Nous donnons une estimation de l'angle solide moyen pour chaque maillage de nos dispositifs RTI. Plus cet angle solide est petit, plus la discrétisation de la mesure est fine en terme d'angle d'illumination. Pour un cône régulier, il est possible de déduire l'angle plan de l'apex du cône, noté  $\theta_{apex}$ , à partir de l'angle solide exprimée en stéradians.

$$\theta_{apex} = 2 \arccos\left(1 - \frac{\Omega}{2\pi}\right) \quad (2.10)$$

Cet angle correspond à l'angle au sommet du cône dans un plan contenant l'axe de révolution. Nous donnons cette valeur d'angle classique car elle est plus familière et ne nécessite pas de connaissances particulières

FIGURE 2.13 – Angle solide du triangle sphérique défini par les vecteurs  $a, b$  et  $c$ 

pour être lue. La valeur moyenne et l'écart-type des angles calculés pour chaque dispositif du projet MeSurA sont synthétisés dans le tableau 2.2.

	<i>Dôme v.I</i> 96 LEDs	<i>Sphère MeSurA</i> 112 LEDs	<i>Dôme Opto</i> 91 LEDs
$\Omega$	0.033sr	0.054sr	0.047sr
$\sigma_{\Omega}$	0.005sr	0.01sr	0.005sr
$\theta_{apex}$	12°	15°	14°
$\sigma_{\theta_{apex}}$	1°	1.5°	0.8°

TABLE 2.2 – Résolution angulaire d'illumination

La Sphère MeSurA a une discrétisation en terme d'angle d'illumination moins fine que les deux autres instruments, cependant cette diminution de la résolution angulaire d'illumination s'est faite au profit d'une extension des points de vue grâce à une conception mettant en œuvre plusieurs points de vue (système multi-caméras).

Nous disposons de caractéristiques pour comparer les performances relatives aux dispositifs RTI. La capacité peut être déterminée selon les besoins de détection qui ne peuvent pas être listés de manière exhaustive. Ces caractéristiques tiennent compte à la fois de la résolution spatiale du couple capteur CCD/objectif mais également de la résolution angulaire associée aux angles d'illumination qui est la spécificité des approches RTI par rapport à d'autres techniques de vision classique en industrie.

## 2.3 Développements logiciels

A partir des données RTI, différents traitements peuvent être réalisés pour exploiter l'information issue de l'acquisition stéréophotométrique. L'ensemble des méthodes proposées dans nos travaux ont été implémentées sur deux environnements de programmation distincts. Par ordre d'apparition dans le cycle de création, les méthodes sont codées sur l'environnement de programmation Matlab pendant la phase de prototypage et d'expérimentation avant d'être implémentées dans l'environnement de production (langage C++) sur lequel le programme final est exécuté opérationnellement. Le passage entre les deux environnements de programmation est assuré par Fabrice Frelin, ingénieur informaticien au Laboratoire SYMME, chargé du développement de l'application *MsaTool*® décrite ci-dessous.

### 2.3.1 Logiciels RTI

#### — Application sur Matlab

Une des différences de l'application développée sur Matlab par rapport au logiciel final *MsaTool* est qu'elle intègre les trois modélisations RTI : PTM, HSH et DMD. On peut ainsi basculer au moyen d'un menu déroulant (figure 2.14) entre les différentes approximations ce qui permet une comparaison visuelle des différents rendus dans une même direction d'illumination afin de mieux comprendre les avantages et les inconvénients de chacune des modélisations.

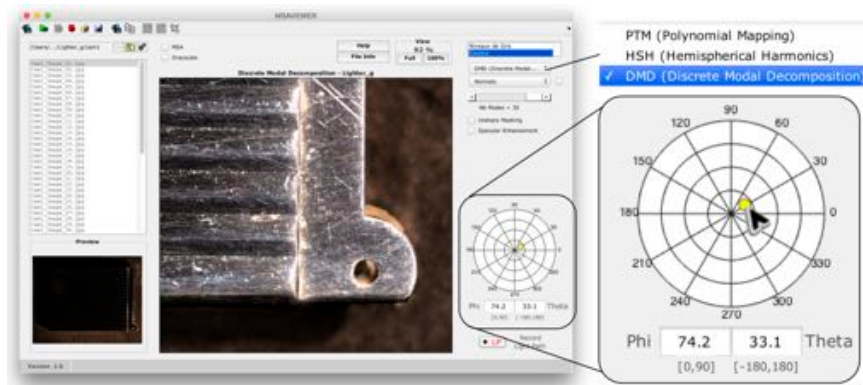


FIGURE 2.14 – Programme Matlab dédié à la reconstruction RTI et ces traitements

La principale fonction de l'application est de permettre de modifier dynamiquement l'incidence d'éclairage de la pièce afin d'observer les effets sur la surface. L'angle d'illumination peut en effet être modifié en déplaçant le rond jaune sur l'élément graphique qui représente le dôme matériel de prises d'images. Son centre correspond au sommet d'un dôme qui couvre la surface d'une demisphère. Par commodité nous utiliserons *dôme* pour désigner l'objet virtuel. Le petit cercle jaune visible sur le dôme représente la position courante d'éclairage. Ce point peut être déplacé avec la souris à n'importe quel endroit du dôme ce qui aura pour effet de modifier instantanément l'éclairage de la pièce en fonction du déplacement de la souris. L'échantillon visible dans les figures 2.14 et 2.15 correspond à une zone d'un briquet guilloché. Les résultats de reconstruction obtenus par les différentes modélisations sont synthétisés dans la figure 2.15 pour deux directions d'éclairage distinctes notées S1 et S2 qui coïncident avec des angles d'illumination du dispositif pour avoir un référentiel de comparaison. Nous nous en tenons ici à un aspect phénoménologique des interactions de la lumière avec la surface en effectuant des comparaisons visuelles entre les photographies de l'acquisition et les images des reconstructions afin de vérifier que les phénomènes étudiés sont qualitativement bien reproduits. On parle de rendu photo-réaliste. Le principe de notre approximation basée sur la DMD fera l'objet d'une présentation détaillée dans le chapitre 3. Les performances des différents modèles géométriques continus d'approximation de forme ont été évaluées grâce à un protocole d'analyse à pire-cas dans la section 3.2.1 avec des critères objectifs en lien avec la sensation visuelle humaine.

#### — Application *MsaTool*<sup>®</sup>

La construction MSA (MeSurA) qui donne son nom au logiciel, utilise uniquement la Décomposition Modale Discrète à la différence de l'application développée sur *MsaTool*<sup>®</sup>. On retrouve sur le logiciel final les éléments de l'application Matlab. Un soin particulier a été porté à l'interface pour faciliter l'utilisation des outils d'aide au contrôle d'aspect par les opérateurs. Pour la construction MSA, nous devons disposer d'un lot d'images prises avec un des dispositifs ainsi que le fichier de positions d'éclairage qui porte l'extension *.lp*. Si une construction MSA nouvellement créée apparaît en niveaux

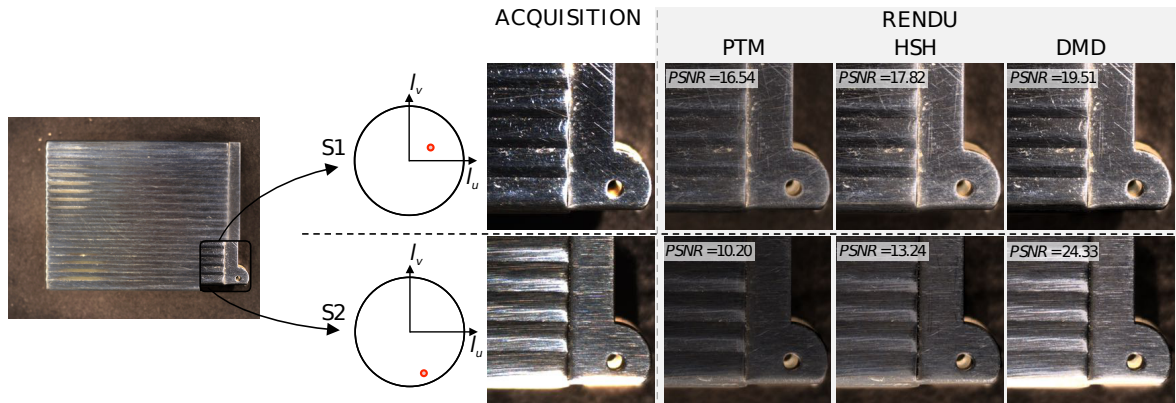


FIGURE 2.15 – Vues agrandies des images originales et reconstruites d’un briquet guilloché, par les méthodes PTM (polynômes de degré 2), HSH (2<sup>nd</sup> ordre des harmoniques hémisphériques) et DMD (49 premiers modes), pour deux directions d’éclairage notées S1 et S2

de gris alors que les images sources sont en couleur, on peut cocher la case *Couleur* du panneau de contrôle pour basculer en mode couleur. Nous rappelons que le calcul effectué pour restituer la couleur, est basée sur une estimation de la chromaticité (la couleur sans la luminance) selon le principe décrit dans la section 1.3.3. Pour des besoins d’automatisation, il est possible de passer un certain nombre d’arguments en ligne de commande pour déclencher automatiquement la construction MSA. La qualité de reconstruction MSA se définit en nombre de modes. Plus ce nombre est élevé et plus le rendu à l’écran est conforme à l’aspect de la pièce observée. Toutefois il ne faut pas confondre ce fonctionnement avec une simple augmentation de détails. Ce aspect de la modélisation DMD sera expliqué dans le chapitre 3. Des exemples de surfaces de produit observés avec le logiciel sont donnés dans la figure 2.16.

Notre méthodologie consiste dans la mise en œuvre de deux approches complémentaires pour répondre à la problématique de maîtrise de l’aspect des surfaces. La première approche dite « lumière » est basée sur la modélisation des interactions lumière/surface et la seconde approche est une approche « géométrique » basée sur l’information en pentes et courbures dans le but de mieux comprendre les relations entre la micro-géométrie et les variations d’aspect. De ce fait, les deux logiciels intègrent le mode de visualisation RTI/MSA et un mode de représentation des cartographies en pentes et courbures (cf. chapitre 5). Le passage entre les différentes modalités de représentation de la surface inspectée se fait au moyen d’onglets sur les interfaces logicielles.

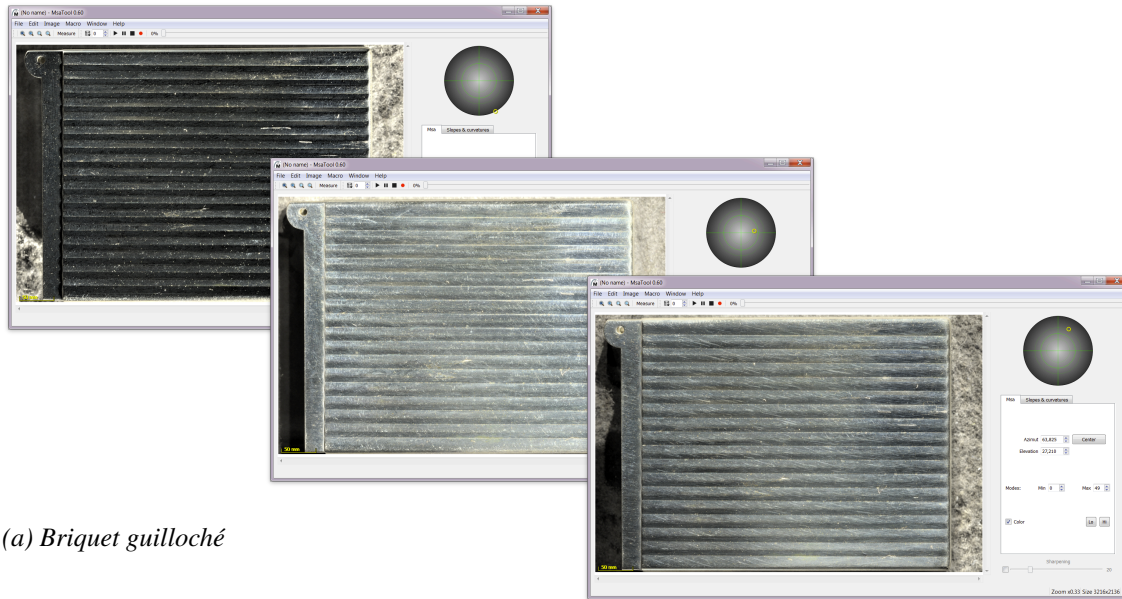
### 2.3.2 Formalisation du processus d’inspection

Plusieurs outils sont proposés pour aider l’opérateur dans sa tâche d’inspection de la surface, et mieux formaliser le processus d’exploration.

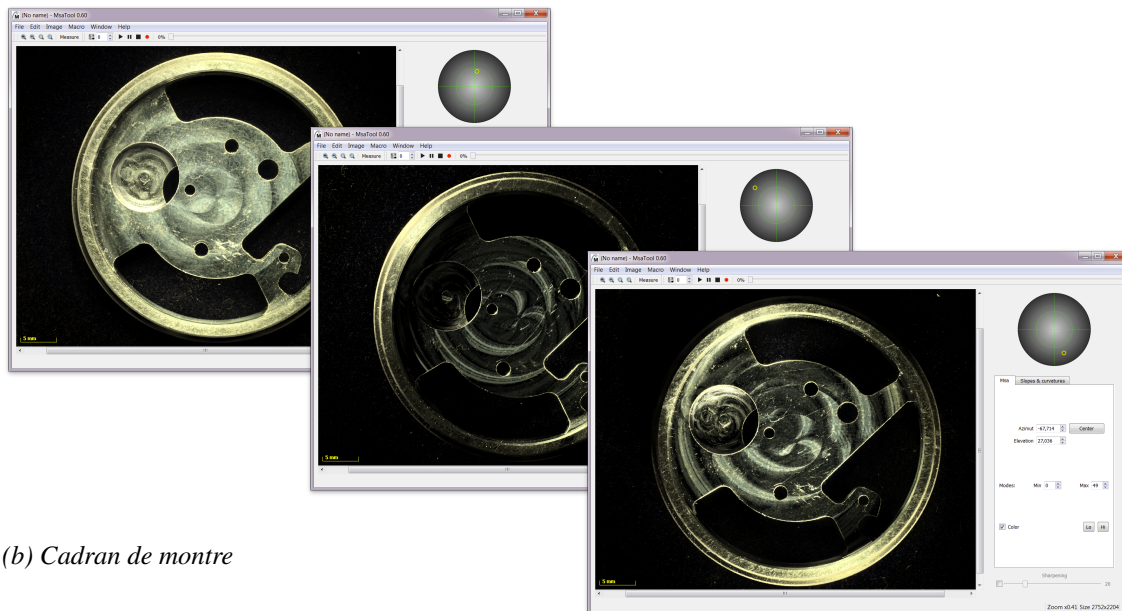
#### — Chemin d’éclairage

Ce parcours d’éclairage est le fruit de l’expérience des opérateurs et est souvent répété sur chaque produit d’un même lot. En ce sens, nous avons proposé un outil pour automatiser le chemin d’éclairage. On peut ainsi reproduire un chemin d’éclairage à l’identique autant de fois que nécessaire ce qui a pour effet de limiter la variabilité d’exploration entre les produits. Pour réaliser des parcours réguliers ou de formes cycliques et ne pas gêner le travail d’inspection, ce travail peut être simplifié grâce aux *Motifs Géométriques* dont le but est de faciliter la création de macros. L’idée est de générer automatiquement une macro à partir de formes géométriques élémentaires qui sont paramétrables.

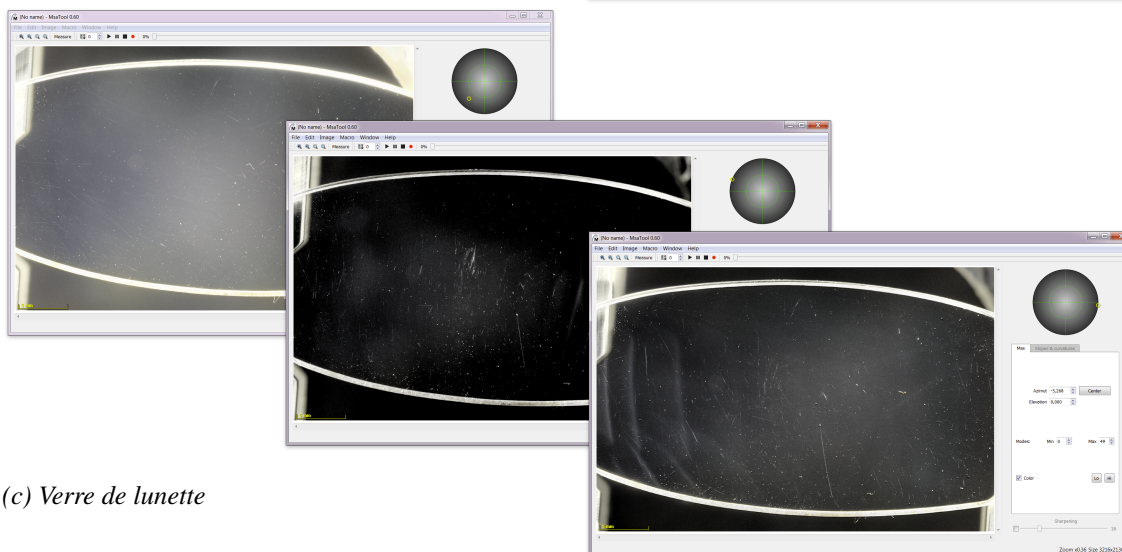




(a) Briquet guilloché



(b) Cadran de montre



(c) Verre de lunette

FIGURE 2.16 – Exemples d'échantillon observés avec le logiciel de visualisation Application MsaTool®

L'utilisateur sélectionne un motif parmi une liste prédéfinie, par exemple une ellipse. Puis il règle des dimensions, sa position, et sur simple validation le motif est transformé en macro.

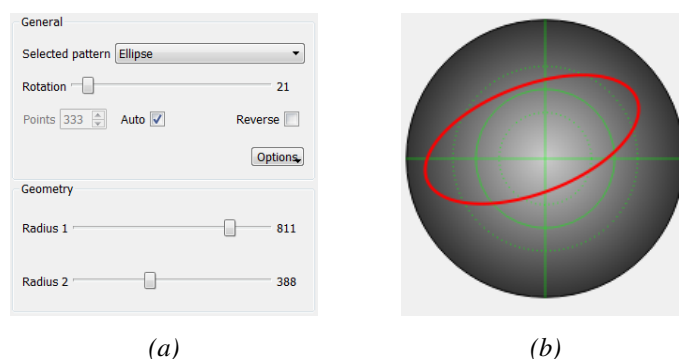


FIGURE 2.17 – Automatisation du chemin d'éclairage avec des motifs géométriques

### — un assistant d'étalonnage

A partir du moment où est introduit dans le dispositif un objet dont les dimensions sont connues, on peut réaliser un étalonnage permettant d'établir une relation entre les pixels et l'unité de longueur métrique. Il suffit de mesurer en pixels un élément ou une côte en pixels dont on connaît parfaitement la longueur dans cette unité. Une fonction est intégrée permettant d'effectuer indépendamment du zoom cet étalonnage. Le principe est simple : le premier clic de souris sur une image pose le premier point d'un nouvel axe et on déplace la souris vers la position du second point définissant ainsi un segment sur la surface de l'objet observé. On peut alors via un menu contextuel attribué à ce segment virtuel, sa longueur réelle. L'information enregistrée permet de conserver ce référentiel de mesure quel que soit le mode d'affichage de la représentation (pentes, courbures, rendu RTI...) ou du zoom en cours. L'échelle courante se situe en bas à gauche du panneau principal.

D'autres outils viendront compléter le logiciel *MsaTool*<sup>®</sup> en lien avec les développements proposés dans le chapitre 4 dédiés à la localisation automatique des anomalies d'aspect et à la définition d'attributs pour évaluer leur criticité en terme de visibilité.

## 2.4 Conclusion

Nos contributions dans ce chapitre concernent les aspects spécifiques à l'instrumentation d'une part et d'autre part à la conception logicielle pour l'exploitation de la mesure. Si dans un premier temps, la technique RTI fut dédiée principalement à l'observation empirique des objets, de peintures, ou d'artéfacts du patrimoine culturel et naturel, son utilisation et sa mise au point en tant qu'instrument de mesure de l'aspect dans les installations industrielles est nouvelle. La construction d'un instrument de mesure industriel exige de rationaliser sa démarche et de donner les éléments constitutifs des caractéristiques du dispositif et de la mesure. Nous avons apporté ainsi des éléments de réponse aux problématiques d'étalonnage et de définition des capacités d'un dispositif de mesure RTI dédié à l'inspection visuelle des surfaces. Cette tâche est d'autant plus difficile du fait que le dispositif RTI ne caractérise que partiellement la BRDF et ne peut pas être objectivement comparé avec des équipements de référence de mesure de la BRDF (goniospectrophotomètre).

En résumé, les avancées présentées s'insèrent dans un but de contrôle de la qualité via une objectivation du contrôle sensoriel, et couvrent les deux extrémités de la chaîne de mesure de la méthodologie, à savoir :

☞ **la conception et la caractérisation d'un dispositif d'acquisition RTI appelé *Sphère MeSurA*.**

Nous avons commencé par faire le descriptif des solutions techniques retenues pour garantir la fonction de ce système d'acquisition. Nous avons mis l'accent sur les améliorations matérielles par rapport aux dispositifs RTI existants qui vont dans le sens d'une meilleure maîtrise de la qualité des résultats de la mesure (maîtrise des sources d'éclairage, extension des points de vue, rapidité de l'acquisition). Nous avons proposé d'établir des caractéristiques des dispositifs en adéquation avec ce qu'ils doivent mesurer ou vérifier. Nous avons vérifié la répétabilité du dispositif et nous avons proposé une procédure pour mesurer la reproductibilité du dispositif, et contrôler sa stabilité dans le temps au moyen de graphes de relevés afin de faciliter l'identification d'une dérive de la mesure dans des directions particulières du dispositif. Il s'agit de vérifier la capacité de la sphère MeSurA à reproduire les mêmes résultats mais également de s'assurer de l'interchangeabilité des différents dispositifs RTI de même type, afin de garantir à l'utilisateur des résultats identiques lors du contrôle d'une même pièce.

☞ **le développement des outils logiciels qui seront directement utilisés par les opérateurs.**

Nous ne sommes pas entrés dans les détails de la chaîne de traitement des données stéréophotométriques acquises par les dispositifs RTI et des méthodes qui la composent. Ces parties seront abordées dans la suite des travaux. Le logiciel *MsaTool*® permet de simuler un éclairage virtuel sur la surface, à la manière de ce qui est réalisé par les opérateurs en contrôle manuel, afin de mettre en évidence les anomalies d'aspect. Cette exploration permet ainsi de faciliter la détection, mais aussi d'accéder à une information riche pour l'évaluation et la décision. Les outils présentés (assistant d'étalonnage et macros de parcours d'éclairage) vont dans le sens d'une formalisation de l'usage du système d'acquisition et de visualisation de ces informations en donnant aux experts les moyens de collecter et d'enregistrer des connaissances sur l'aspect des produits fabriqués par l'entreprise.

A ce jour, l'application n'a pas été mise en œuvre dans les entreprises même si les industriels ont montré un intérêt important. Son utilisation permet de mettre en évidence en quelques secondes les anomalies d'aspect sans manipulation des produits en faisant varier virtuellement la direction d'illumination sur la surface. De nombreuses surfaces à forte valeur ajoutée sur lesquelles le contrôle et particulièrement la détection des anomalies d'aspect représentent un enjeu industriel important, ont été testées (plastique, métal, verre, acier, bois, ...) montrant ainsi l'efficacité et la robustesse de la méthode quelque soit le matériau et les propriétés de réflexion de la surface inspectée.

Les chapitres suivants portent sur nos contributions de recherche en lien avec le traitement et l'exploitation des données d'acquisition RTI. L'amélioration de la qualité de reconstruction RTI est réalisée à l'aide d'une nouvelle méthode d'approximation des surfaces de luminance basée sur le principe de la Décomposition Modale Discrète, qui fait l'objet d'une présentation détaillée dans le chapitre 3. Nous montrons que cette modélisation est plus pertinente vis-à-vis des surfaces des produits mesurés en industrie et des caractéristiques recherchées associées à des comportements spéculaires.



## Modélisation de l'aspect par l'approche modale

### Sommaire

<b>3.1</b>	<b>Approximation des surfaces de luminance par la DMD</b>	<b>58</b>
3.1.1	Principe	58
3.1.2	Base de projection	58
3.1.3	Reconstruction	59
<b>3.2</b>	<b>Performances des approximations RTI</b>	<b>60</b>
3.2.1	Protocole d'évaluation et de comparaison RTI	61
3.2.2	Mesures visuelles et subjectives	61
3.2.3	Mesures objectives : PSNR et de SSIM	63
3.2.4	Paramètres statistiques de forme, calculés sur les distributions des luminances	63
<b>3.3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>67</b>

### 3.1 Approximation des surfaces de luminance par la DMD

L'une des critiques majeures faites aux modélisations existantes associées à une famille de fonction polynômiale de second ordre (PTM), et à une base vectorielle constituée de 16 harmoniques hémisphériques (HSH), concerne le lissage des surfaces de luminance induit par ces approximations de forme qui peuvent générer à la reconstruction des différences perceptibles de comportement lumineux sur le rendu des surfaces des produits inspectés. Notre objectif principal consiste en une contribution à l'amélioration de l'approximation continue du nuage de luminances acquises en tout point de la surface de l'échantillon afin d'améliorer le rendu photoréaliste des anomalies d'aspect et plus généralement des comportements spéculaires. Ces derniers ne sont souvent pas pris en considération dans les domaines où les techniques RTI sont habituellement utilisées (patrimoine, archéologie,...). Dans le cadre industriel, le rôle des spécularités est particulièrement important car outre qu'elles confèrent un caractère saillant aux anomalies d'aspect, la prise en compte de la réflexion spéculaire est essentielle car elle traduit de nombreuses variations d'aspect liées à la finition des surfaces de produits manufacturés. Les deux contributions de ce chapitre concernent le développement d'une nouvelle modélisation RTI basée sur le principe de la Décomposition Modale Discrète d'une part et d'autre part une analyse comparative de la qualité de reconstruction pour montrer l'intérêt et les performances de la DMD au regard des approches PTM et HSH.

#### 3.1.1 Principe

La technique de Décomposition Modale Discrète (DMD) consiste à utiliser un espace de projection issu de la mécanique vibratoire. Similaire à une transformation de Fourier discrète, cette décomposition permet d'évaluer le contenu spectral d'un signal discret à partir d'une base de projection composée de vecteurs propres, résultants d'un problème de dynamique des structures. La DMD a notamment été appliquée pour :

- Caractériser et spécifier les écarts géométriques de forme dans le domaine du tolérancement géométrique [Favreliere 09, Samper 09],
- Réaliser une analyse multi-échelle de mesures topographiques 3D dans le domaine des états surfaces [Le Goïc 11, Grandjean 12] pour mettre en évidence les ordres de défauts de ces mesures (forme, ondulation et rugosité),
- Estimer la position des sources de chaleur [Pottier 13, Pottier 14].

Nous proposons donc dans ces travaux d'utiliser la DMD comme méthode d'approximation des surfaces de luminance.

#### 3.1.2 Base de projection

Le domaine hémisphérique  $[0, \frac{\pi}{2}] \times [0, 2\pi]$  désigne l'hémisphère locale de la BRDF aux points de surface où l'intégrale de réflexion est évaluée. Si l'on éclaire une surface parfaitement diffuse, la valeur de luminance sera la même dans toutes les directions qui se trouvent dans le demi-espace adjacent à la surface (réflectance Lambertienne). Par conséquent, la géométrie associée au problème de dynamique des structures, permettant le calcul des vecteurs propres qui compose la base de projection, sera une surface hémisphérique. Concernant la formulation des hypothèses, liées aux conditions limites d'un problème de dynamique des structures, il a été choisi d'imposer un déplacement nul sur le cercle de base de la surface hémisphérique. Ce choix permet d'obtenir une base de projection plus pertinente vis-à-vis de la forme complexe des surfaces de luminance (figure 3.1). La définition du problème de dynamique des structures est classiquement défini comme suit :

$$M.\ddot{q} + K.q = 0 \quad \text{with} \quad q = q(\theta, \phi, t) \quad (3.1)$$

où  $M$  et  $K$  représentent respectivement les matrices de masse et de raideur.  $q(\theta, \phi, t)$  représente le vecteur déplacement qui caractérise les formes modales. Les solutions d'un tel problème peuvent s'écrire :

$$q(\theta, \phi, t) = \sum_{k=1}^{+\infty} Q_k \cos(w_k t) \quad (3.2)$$

où  $Q_k$  est le vecteur d'amplitude associé à la pulsation  $w_k$ . Les modes propres définis par  $(Q_k, w_k)$  sont déterminés en résolvant le système linéaire suivant :

$$(M^{-1}K - \frac{1}{w_k^2}I)Q_k = 0 \quad (3.3)$$

où  $I$  est la matrice identité et  $M^{-1}K$  est supposée être diagonalisable. La solution discrète est calculée par une analyse éléments finis et forme la base de projection appelée base modale  $(Q_0, Q_1, \dots, Q_{n-1})$ , où  $n$  désigne le nombre de modes calculés.

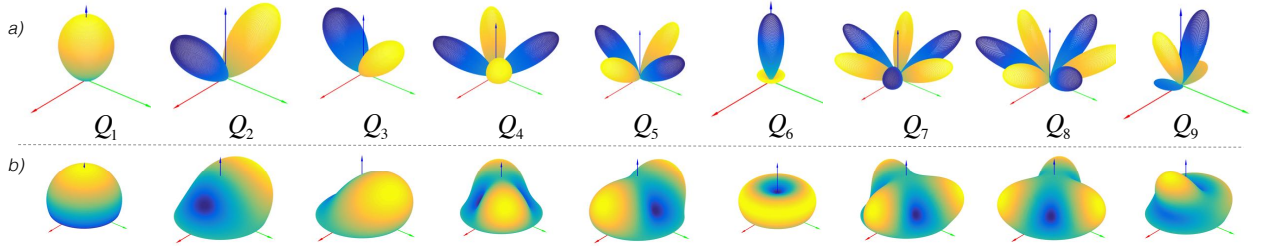


FIGURE 3.1 – Représentation de la base de descripteurs de l'approche DMD

### 3.1.3 Reconstruction

Ainsi, toutes les surfaces de luminance  $f$  peuvent être exprimées comme la somme d'une combinaison linéaire des vecteurs modaux et du résidu de la décomposition  $R_n$  :

$$f_{(\theta_v, \phi_v)}(\theta_i, \phi_i) = \sum_{k=1}^n \lambda_k(\theta_v, \phi_v) Q_k(\theta_i, \phi_i) + R_n \quad (3.4)$$

où les coefficients modaux  $\lambda_k$  sont obtenus par la projection du vecteur des luminances mesurées  $L$  sur chacun des modes de la base. Cependant, la base modale n'étant pas orthonormale, l'opérateur de projection classique  $P_Q = QQ^T$  ne peut pas être utilisé. En effet, l'utilisation de la base duale  $Q^* = (Q^T Q)^{-1} Q^T$  est requise. Une norme infinie est donnée aux vecteurs modaux tel que  $\|Q_k\|_\infty = 1$ . Ainsi, l'ensemble des coefficients modaux résultants de la projection de luminances  $L$  dans la base de projection modale non-orthonormale est donnée comme suit :

$$\lambda_k(\theta_v, \phi_v) = (Q_k^T Q_k)^{-1} Q_k^T . L \quad (3.5)$$

Le paramétrage modal utilise donc une base de projection adaptative au niveau du nombre de modes mais également sur leur forme en ajustant les conditions limites du problème de dynamique des structures. Toujours dans l'objectif d'affiner l'approximation des surfaces de luminance, il est possible d'enrichir la base modale avec des formes prédéfinies, appelées modes « technologiques » dans les travaux d'Adragna [Adragna 06]. Les premiers vecteurs modaux ou modes qui composent la base modale dite « naturelle » sont donnés dans la figure 3.1 avec la même représentation de couleur que les descripteurs HSH de la figure 1.14. La complexité de la forme des modes augmente naturellement lorsque l'ordre  $n$  augmente. En pratique, le nombre de modes utilisés pour la projection ne peut pas être égal au nombre de luminances mesurées afin

d'éviter le phénomène de repliement. Ainsi, le nombre de modes est choisi de façon à respecter le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon. La figure 3.2 présente la surface de luminance du même pixel approximée respectivement avec les 6 descripteurs polynomiaux de la modélisation PTM (section 1.3.2), avec les 16 harmoniques hémisphériques de la modélisation HSH (section 1.3.2), et enfin avec les 49 descripteurs modaux de la modélisation DMD. On constate que les variations de la luminance sont mieux approximées permettant de reconstruire plus fidèlement les comportements spéculaires qui peuvent être l'effet d'une microgéométrie particulière sur la surface.

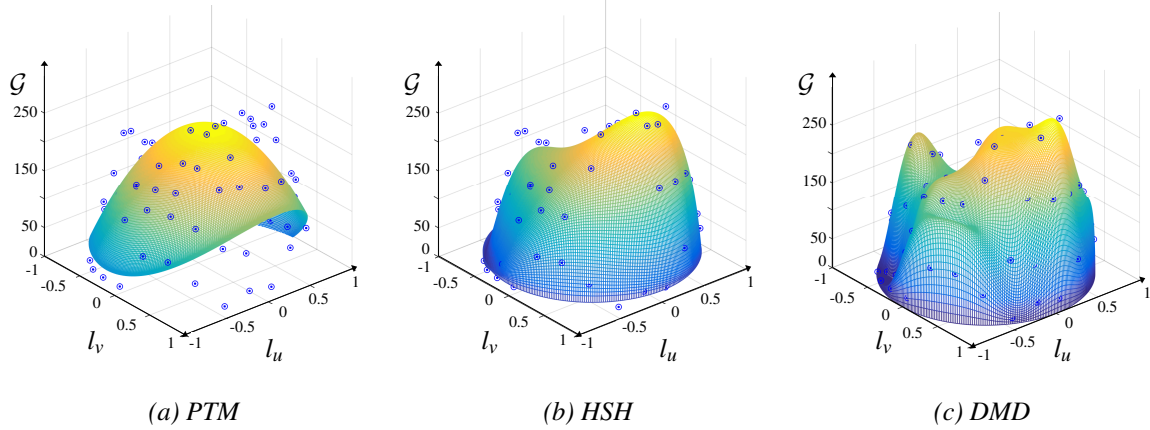


FIGURE 3.2 – Surface approximée de luminance, pour un même pixel, par les méthodes (a) PTM (polynômes de degré 2) (b) HSH (2<sup>nd</sup> ordre des harmoniques hémisphériques) et (c) DMD (49 premiers descripteurs modaux)

### 3.2 Performances des approximations RTI

La modélisation DMD a pour but d'améliorer la fidélité des reconstructions RTI en terme de photoréalisme et de faciliter ainsi l'analyse de la micro-géométrie des surfaces d'ingenierie. Les surfaces industrielles mesurées concernent principalement des surfaces métalliques dont l'aspect brillant est obtenu à l'issue de différentes opérations de finition (satinage, sablage, polissage, etc.). Les altérations liées à leur fabrication, leur manipulation ou à leurs usages ultérieurs produisent sur les surfaces diverses anomalies telles que des rayures, des piqûres, des tâches, etc. Le comportement visuel de ces anomalies est complexe, et leur étude nécessite une description fine des formes, variables et complexes, de reflectance locales. L'approche modale est appliquée sur une acquisition d'un anneau métallique réalisée au moyen du dôme d'acquisition (96 LEDs). Cet échantillon, observé avec le logiciel *MsaTool*<sup>®</sup> dans la figure 3.3, présente des caractéristiques intéressantes pour montrer l'intérêt de la modélisation DMD car l'exploration fait apparaître une grande variété d'anomalies à la surface en faisant varier virtuellement les directions d'illumination. La pertinence de l'approche DMD est étudiée en comparant les résultats avec ceux obtenus par les deux autres modélisations RTI les plus couramment utilisées, respectivement associées à une famille de fonctions géométriques polynômiales de second ordre (PTM), et à une base vectorielle constituée de 16 harmoniques hémisphériques (HSH). L'application de la méthode DMD est réalisée avec une famille libre de 49 vecteurs modaux, compte tenu du nombre de configurations d'éclairage indépendantes et par application du théorème d'échantillonnage de Shannon.

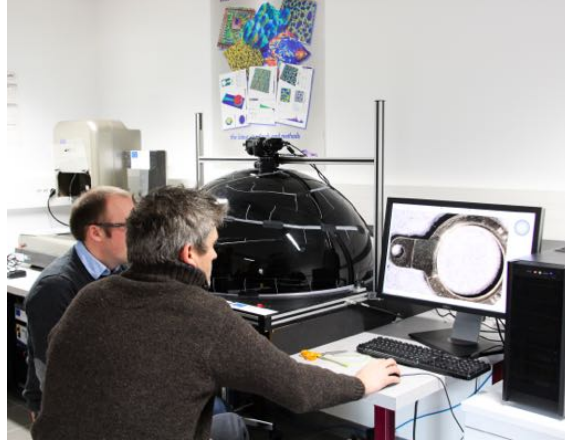


FIGURE 3.3 – Anneau teinté : échantillon d'application observé à l'aide du logiciel MsaTool®

### 3.2.1 Protocole d'évaluation et de comparaison RTI

La plupart des approches comparatives existantes sont connues comme *full-reference*, ce qui signifie qu'une image de référence complète est supposée connue. Or, l'évaluation de la qualité RTI nous intéresse dans les directions d'éclairage situées entre les positions des sources lumineuses du dispositif ; précisément les angles d'éclairage pour lesquels aucune image n'a été capturée et l'apparence *réelle* de la surface étudiée n'est de fait pas connue. Nous proposons un protocole de comparaison pour pallier à cette inconnue. L'originalité de ce protocole est de comparer visuellement l'image reconstruite et l'image *réelle* non prise en compte dans le calcul de la surface reflectance interpolée afin de quantifier l'erreur de reconstruction pour la direction d'illumination correspondante  $(\theta_i, \phi_i)$ . Dans un premier temps, nous identifions visuellement (approche phénoménologique) les non-similarités entre chaque méthode sur les images obtenues pour des directions d'éclairage choisies arbitrairement. Dans un second temps, des mesures de qualité basées sur des modèles théoriques seront calculées à partir des  $m$  images obtenues par le dispositif. Le protocole d'obtention des images à comparer est utilisé de manière similaire pour l'analyse comparative visuelle (section 3.2.2) et statistique (section 3.2.3).

### 3.2.2 Mesures visuelles et subjectives

La figure 3.4 représente l'image *réelle* et les résultats des 3 reconstructions RTI dans la direction d'éclairage indiquée sur le repère  $(l_u, l_v)$ . Si des résultats équivalents sont obtenus localement pour les comportements de réflectances lambertiens (essentiellement diffus), on observe qu'une approximation plus fidèle des lobes spéculaires, et plus généralement des zones locales de surfaces brillantes est obtenue par l'approche DMD. Le rendu des anomalies présentes sur la surface de l'objet est mieux visible sur les vues rapprochées de la figure 3.5. Deux directions d'éclairage ont été choisies correspondant respectivement à une incidence d'éclairage normale et une incidence quasi-rasante à la surface. Les configurations d'illumination distinctes mettent en évidence des rayures différentes sur la même zone d'intérêt. Cela s'explique par le fait que les lobes spéculaires causés par des défauts fins de type rayure sont concentrés dans une très petite région angulaire autour de la direction spéculaire. Les rayures sont difficilement discernables sur les images reconstruites issues des approches PTM et HSH suite à un effet de lissage de la réflectance par ces méthodes d'approximation, tandis qu'elles apparaissent plus contrastées et plus proche de l'image originale sur les rendus DMD. L'importance d'une anomalie peut alors être estimée en fonction de l'effort de détection [Baudet 13] en faisant l'hypothèse qu'une anomalie visible dans un cône d'éclairage limité aura une importance moindre qu'une anomalie de même type visible sur un large angle d'éclairage. On pourra ainsi quantifier



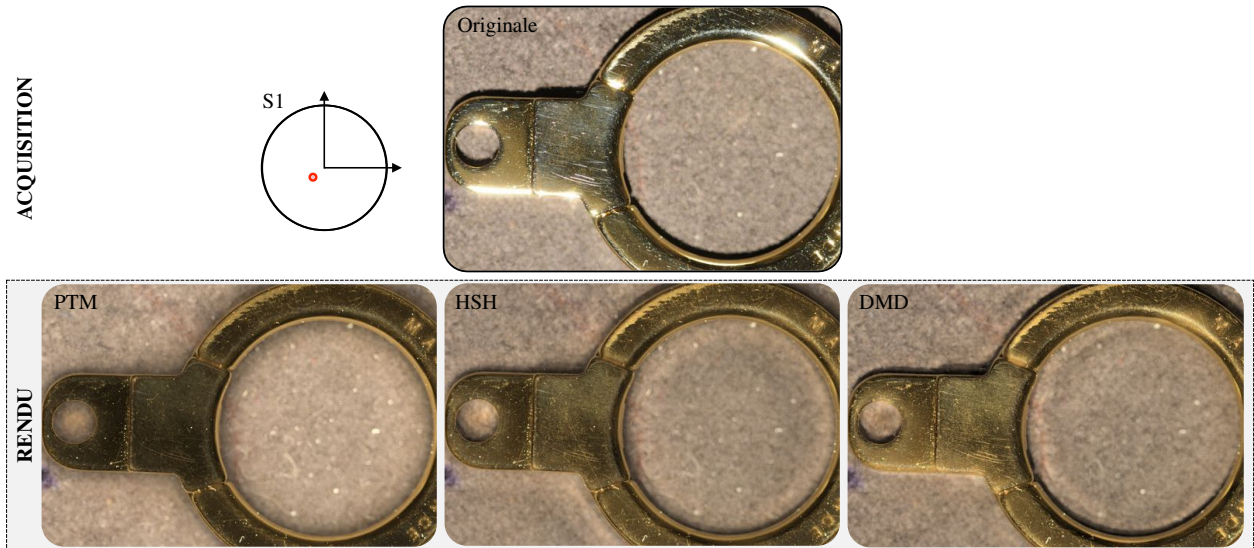


FIGURE 3.4 – Vues globales de l'image originale et reconstruite de l'anneau teinté, par les méthodes PTM (polynômes de degré 2), HSH (2<sup>nd</sup> ordre des harmoniques hémisphériques) et DMD (49 premiers modes), pour une direction d'éclairage du dispositif notée S1

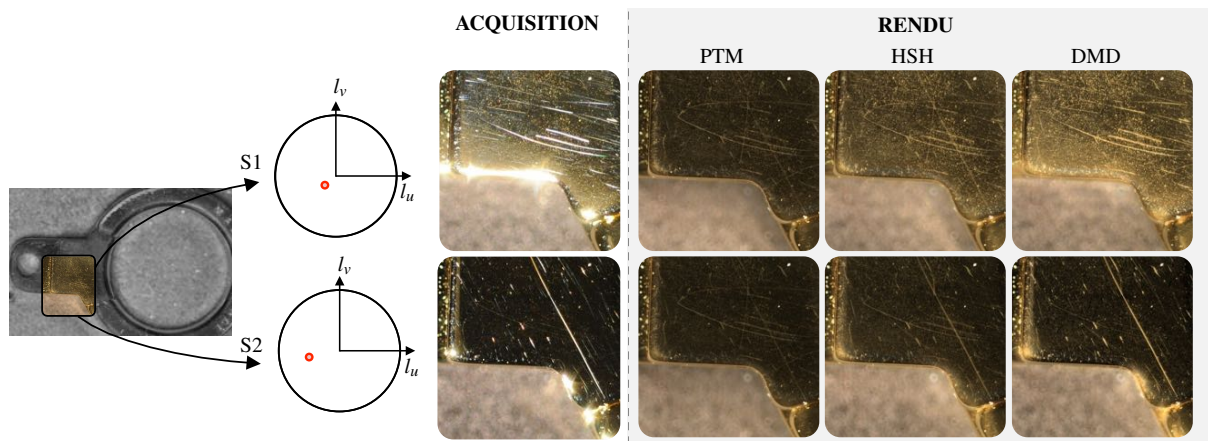


FIGURE 3.5 – Vues agrandies des images originales et reconstruites de l'anneau teinté, par les méthodes PTM (polynômes de degré 2), HSH (2<sup>nd</sup> ordre des harmoniques hémisphériques) et DMD (49 premiers modes), pour deux directions d'éclairage notées S1 et S2

le cône (secteur angulaire) d'éclairage pour lequel elle est visible en s'appuyant sur les descriptions plus réalistes des réflectances locales de micro-géométries modélisées par l'approche DMD.

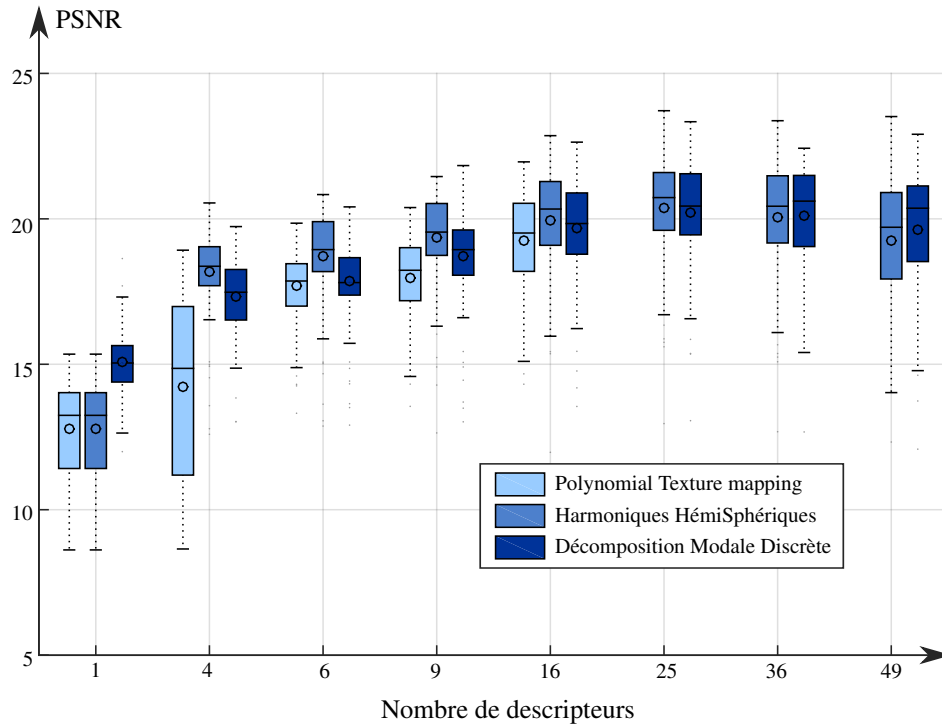
### 3.2.3 Mesures objectives : PSNR et de SSIM

Les critères de qualité d'image *objectifs* sont décomposés en deux familles : les critères non pondérés et les critères pondérés. La première famille correspond aux critères de mathématique classique, car ils sont issus de la géométrie (notion de distance) ou du traitement du signal (rapport signal sur bruit). Le Peak Signal-Noise Ratio (PSNR) est le plus couramment utilisé en image numérique. Mais de nombreuses études [Lorenzetto 98] montrent qu'elles ne reflètent pas toujours la vision humaine du fait que leur calcul n'est pas forcément orienté par des critères du système visuel humain (SVH). Parmi les mesures de qualité pondérées par une fonction modélisant la sensibilité du SVH figure celle proposée par Z. Wang and al. [Wang 05, Wang 04]. L'idée de SSIM est de mesurer la similarité de structure entre les deux images, plutôt qu'une différence pixel à pixel comme le fait par exemple le PSNR. Basée sur une mesure d'erreur prenant en compte des informations spatiales, SSIM exploite les caractéristiques connues du SVH qui montrent que celui-ci est adapté pour extraire l'information structurelle dans une image. Il est basé sur la luminance, le contraste et une mesure de la structure, calculé au travers d'une fenêtre  $8 \times 8$ . Une première étude statistique est menée afin d'évaluer la capabilité des méthodes en terme de nombre de descripteurs utilisés lors de la reconstruction (figure 3.6). PSNR et SSIM sont calculés pour chaque direction d'illumination du dispositif en ne prenant pas en compte l'image correspondante dans le calcul de modélisation RTI. Les boîtes à moustache sont un moyen de représenter sur la même figure les caractéristiques (médiane, quartiles, minimum, maximum) des  $M$  valeurs de PSNR et SSIM obtenues dans les directions d'éclairage du dispositif. Les méthodes semblent offrir un bon compromis entre le coût de la reconstruction (ie. le nombre de descripteurs) et les critères de qualité en utilisant 16 descripteurs. Au dessus de ce nombre, le PSNR n'évolue plus de manière significative et le SSIM diminue. Cependant, ces valeurs sont à mettre en balance avec les résultats donnés précédemment (section 3.2.2) car elles ne reflètent pas les observations faites lors de l'analyse *subjective* (visuelle) des images reconstruites. En effet, les résultats PSNR montrent une très faible différenciation entre 16 harmoniques pour HSH et 49 modes pour DMD bien que les différences visuelles sont facilement discernables sur la figure 3.5. Un constat similaire est fait sur les valeurs SSIM entre 6-PTM et 49-DMD. PSNR et SSIM sont plutôt « intégrales » (donc ont un effet moyennant) alors qu'elles devraient être plutôt du type « dérivées », d'où le fait de leur inefficacité à traduire la saillance qui apparaît en queue des distributions de luminance.

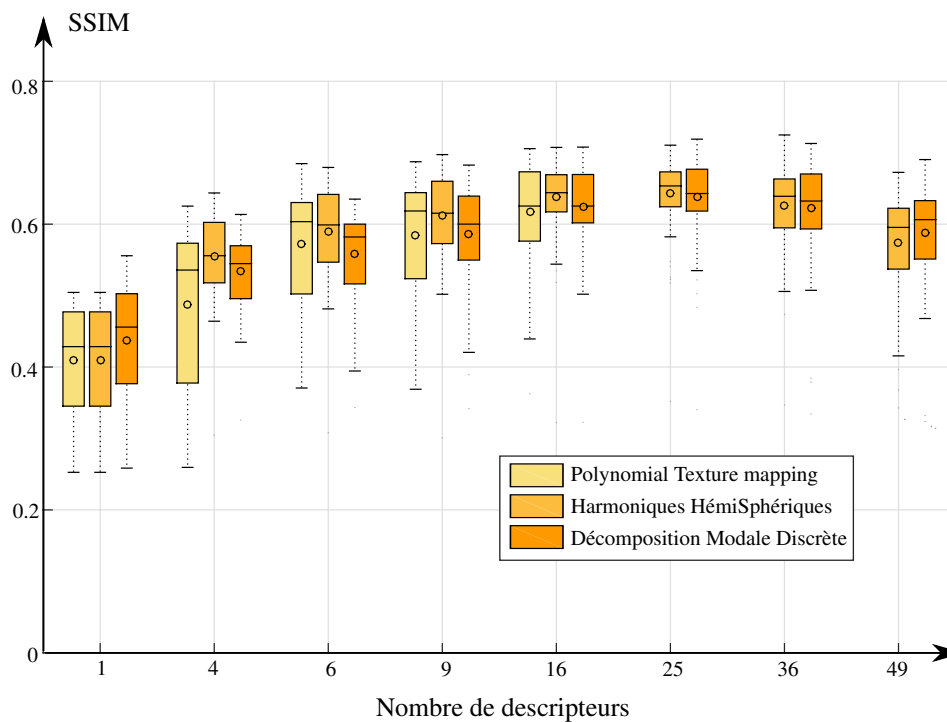
### 3.2.4 Paramètres statistiques de forme, calculés sur les distributions des luminances

Le second aspect de notre approche comparative des techniques RTI se concentre sur *the 4D space of lighting and viewing* et non plus sur l'espace de représentation de *all 2D images*. L'opérateur collecte et traite les variations locales et globales de contraste dans le plan de l'image [Sharan 08] mais également lorsque l'incidence de la lumière varie sur la surface étudiée, afin de décrire de façon factuelle les anomalies qu'il détecte. Analyser les statistiques de ces variations est important pour comprendre la nature des transformations des modèles RTI et comment elles influent sur l'approximation de la fonction réflectance. Une analyse de la forme des distributions des luminances de chaque pixel de l'acquisition RTI est donc réalisée afin d'évaluer l'écart entre les distributions des luminances reconstruites et les distributions des luminances mesurées. La forme des distributions est mesurée à partir des paramètres Skewness et Kurtosis, basés respectivement sur les moments d'ordre 3 et d'ordre 4 de la distribution des luminances. L'indicateur Kurtosis correspond à une mesure de l'aplatissement, ou a contrario de la pointicité d'une distribution (figure 3.8a) et l'indicateur Skewness correspond à une mesure de l'asymétrie d'une distribution (figure 3.8b).





(a)



(b)

FIGURE 3.6 – Comparaison de la qualité de reconstruction RTI basée sur les mesures de (a) PSNR et (b) SSIM, en fonction du nombre de descripteurs utilisés lors de la reconstruction

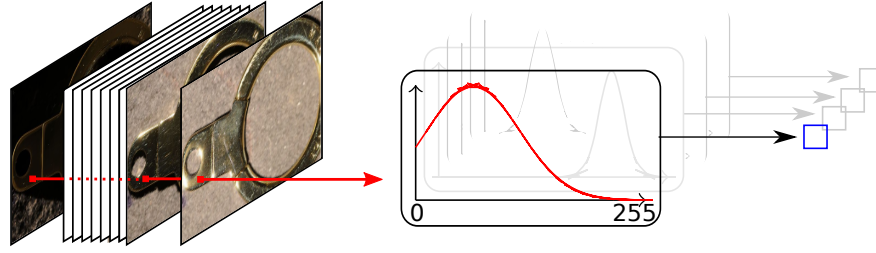


FIGURE 3.7 – Détermination d'un paramètre de forme (scalaire) associée à la distribution des luminances au pixel considéré

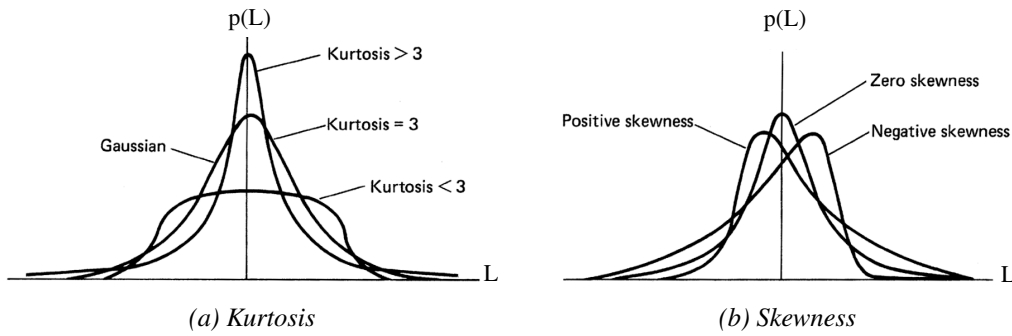


FIGURE 3.8 – Paramètres de forme

Une caractéristique importante de l'indicateur de Kurtosis calculé sur les distributions des luminances mesurées est sa capacité à segmenter les régions de l'image en fonction de leur comportement diffus ou spéculaire (figure 3.8a) : la surface spéculaire de l'objet en jaune, le fond diffusant en bleu, les ombres aux bordures de l'anneau en bleu foncé. Les régions en jaune ont un coefficient de Kurtosis supérieur à 3 impliquant une distribution plus pointue que la normale (distribution mésokurtique) tandis que les régions les plus en bleues inférieures à 3 correspondent à des distributions relativement aplaties (distributions platikurtiques). Une comparaison visuelle entre les cartographies du kurtosis calculé sur les luminances mesurées et reconstruites (figure 3.9) permet de mettre en évidence une nette amélioration du paramètre de forme en utilisant l'approche DMD. L'erreur absolue en pourcentage  $\% \Delta$  est déduit à partir des valeurs moyennes des moments ( $kurt_{obj}$  et  $skew_{obj}$ ) associées aux luminances des pixels appartenant uniquement à l'objet. L'erreur de reconstruction sur  $kurt_{obj}$  est significativement moins importante par l'approche DMD (24%) en comparaison avec les deux autres approches HSH (43%) et PTM (66%) utilisées dans leur développement classique. Un constat similaire est réalisé sur le paramètre d'asymétrie (figure 3.10). Les réflectances diffuses et spéculaires perçues sont également bien corrélées avec l'asymétrie des histogrammes de luminance. Par ailleurs, d'autres dépendances avec des propriétés physiques de la surface peuvent être mises en évidence. Par exemple, des points bleus (skewness négatif) sur la surface de l'objet révèlent la présence de particules rondes telles que des grains de poussière ou des piqûres qui se comportent comme des centres de diffraction. Les pixels associés sont très brillants dans toutes les directions d'illumination se traduisant par une distribution des luminances asymétrique à droite. En raison de la complexité de forme des modes utilisés lors de la décomposition, les techniques HSH et DMD permettent ainsi de mieux approcher le comportement non-lambertien des pixels de la surface en décrivant mieux les variations des luminances auxquelles l'oeil est particulièrement sensible lorsque l'incidence de la lumière varie sur la surface. Skewness et Kurtosis permettent de mettre en évidence les limites de la technique PTM qui tend à aplanir et à uniformiser les distributions des luminances (les variations de luminance) mesurées autour de la valeur médiane.

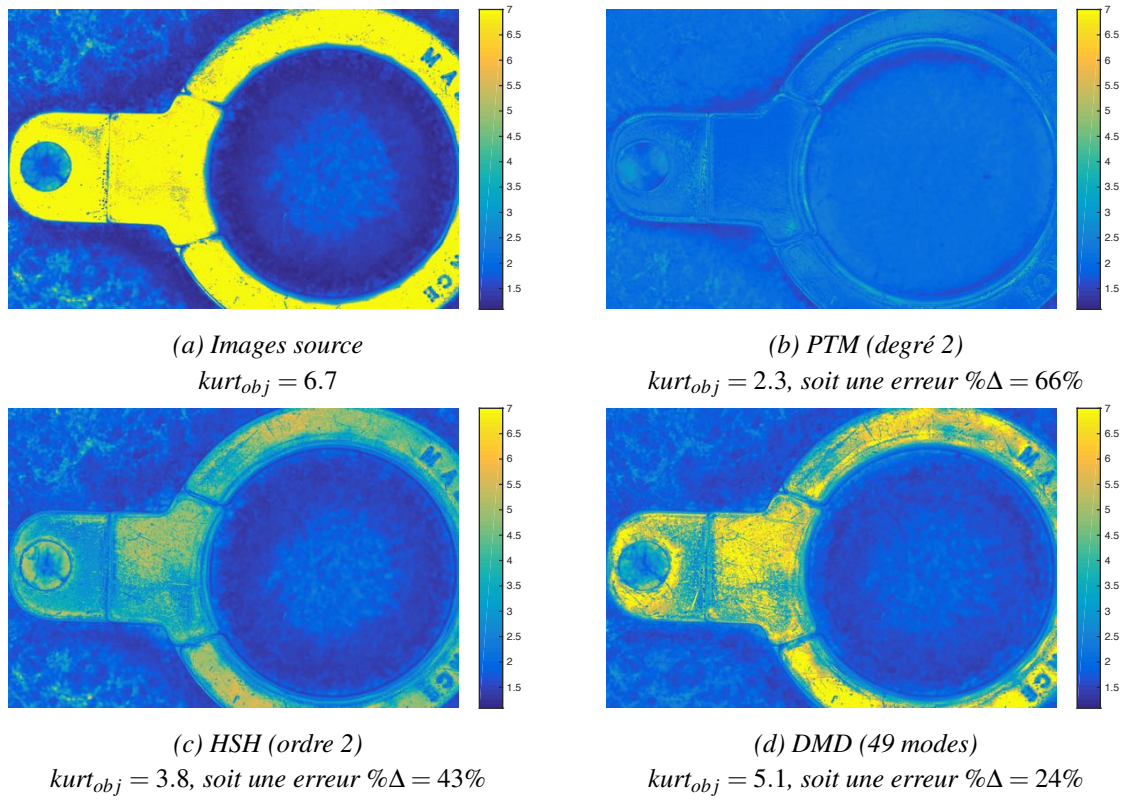


FIGURE 3.9 – Kurtosis calculé sur la distribution des luminances, par pixel, des images originales et reconstruites par les méthodes RTI

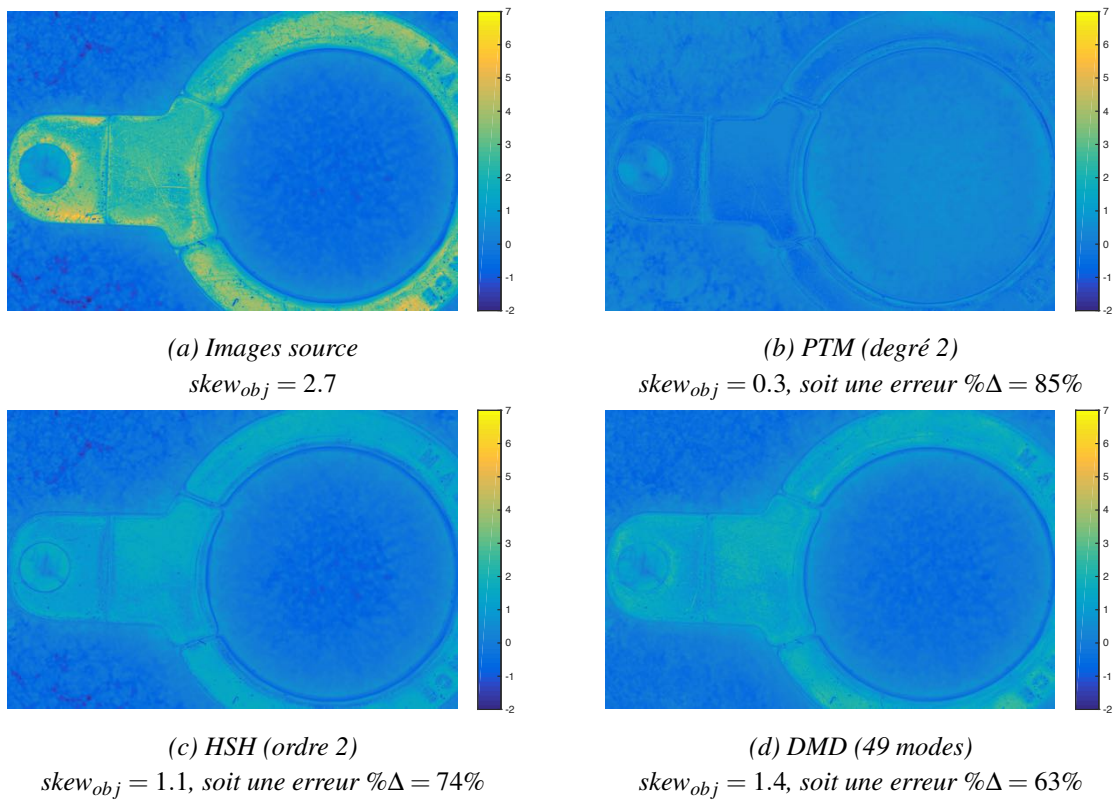


FIGURE 3.10 – Skewness calculé sur la distribution des luminances, par pixel, des images originales et reconstruites par les méthodes RTI

### 3.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une approche robuste et efficace pour modéliser la réflexion locale des surfaces à partir des données photométriques d'acquisition RTI, en se basant sur un paramétrage nommé Décomposition Modale Discrète. En faisant varier la position de l'illumination, la technique RTI vise à enrichir l'information fournie par les images classiques. Chaque pixel est décrit par un ensemble de valeurs plutôt qu'une valeur classique ; chaque valeur correspondant à une position spécifique d'éclairage. La réflectance locale de chaque pixel peut alors être modélisée à partir de l'ensemble des valeurs de luminances associées à chaque direction d'illumination. Cette modélisation s'effectue généralement en appliquant une interpolation (ou approximation) des données discrètes mesurées, en utilisant une famille de fonctions continues. Ce modèle simplifié permet ainsi de simuler de façon instantanée le rendu de la surface dans n'importe quelle incidence (choisie) d'éclairage. La surface est inspectée finalement en faisant varier manuellement la direction de l'éclairage (azimut et colatitude). Cette exploration améliore le rendu des rugosités complexes et de la morphologie locale, et pour des applications industrielles, facilite la détection et l'évaluation des anomalies d'aspect.

La pertinence de l'approche DMD est étudiée en comparant les résultats avec ceux obtenus par les deux méthodes RTI les plus utilisées, qui sont respectivement associés à un polynôme de second ordre (PTM) et une base vectorielle de fonctions harmoniques hémisphériques (HSH). Les critères de performance utilisés généralement (PSNR et SSIM) ne permettent cependant pas de différencier les approches en terme de rendu photoréaliste. Nous proposons donc deux nouvelles cartographies des paramètres statistiques de forme kurtosis et skewness, calculés sur les distributions des luminances de chaque pixel de l'acquisition RTI. En particulier, cette étude montre une caractéristique intéressante de la modélisation de réflexion basée sur le paramétrage DMD dans sa capacité à décrire des réflectances locales complexes en terme de variations angulaires et d'intensité des luminances. Si des résultats équivalents sont obtenus pour les réflectances diffuses (comportement lambertien), une approximation plus fidèle des lobes spéculaires, et plus généralement des zones locales de surfaces brillantes est fournie par cette approche.



## Mesure de similarité de l'aspect des surfaces

### Sommaire

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>70</b>
<b>4.2</b>	<b>Problématique liée à la mesure de similarité</b>	<b>71</b>
<b>4.3</b>	<b>Paramétrage modal invariant à la rotation</b>	<b>73</b>
4.3.1	Principe	73
4.3.2	Invariance à l'orientation de la surface	74
4.3.3	Invariance à l'anisotropie de la texture	75
<b>4.4</b>	<b>Mesure de similarité de l'aspect des surfaces</b>	<b>79</b>
4.4.1	Distance de Mahalanobis	79
4.4.2	Mise en œuvre pour la détection des anomalies	80
4.4.3	Applications de la méthode sur plusieurs surfaces réelles	84
<b>4.5</b>	<b>Evaluation des anomalies d'aspect</b>	<b>86</b>
4.5.1	Pré-traitements	86
4.5.2	Groupes d'attributs	87
4.5.3	Typologie d'anomalie	88
4.5.4	Niveaux de luminance et contraste de luminance	89
4.5.5	Saillance d'une anomalie	90
4.5.6	Cartographie de la visibilité d'une anomalie en fonction des directions d'éclairage	91
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>91</b>

## 4.1 Introduction

Ce chapitre explore la possibilité d'estimer la similarité entre différentes surfaces ou entre les régions d'une même surface, en terme d'apparence ; l'objectif étant de mettre en évidence les régions qui ont des comportements lumineux similaires en les cartographiant. Le système visuel humain procède de façon analogue : il est capable d'extraire des stimuli physiques des invariants spatiaux multimodaux, et de les catégoriser.

Ainsi, l'estimation de la similarité d'aspect est une étape essentielle vers l'automatisation de l'inspection visuelle tant sur le plan de la problématique scientifique (exemples des algorithmes de détection et de caractérisation des anomalies d'aspect) que sur le plan applicatif/industriel. Les algorithmes de détection les plus souvent utilisés effectuent une tâche initiale de reconnaissance de texture (présente sur une image) à partir d'attributs de l'image calculés avec les matrices de cooccurrence [Haddad 97, Amet 98, Desage 15b]. La reconnaissance des textures suppose qu'une phase d'apprentissage sur des surfaces sans défaut puisse être réalisée. Il s'ensuit alors une étape d'identification des anomalies sur les images pour lesquelles le système de reconnaissance n'est pas sûr ; i.e. où la reconnaissance est perturbée par la présence d'une anomalie. On distingue généralement deux approches pour extraire les éventuelles anomalies [Kotani 99] :

- Les approches *supervisées*. Ces techniques impliquent généralement l'apprentissage de l'algorithme sur des anomalies spécifiques. Ce type d'approche est performant pour la détection des anomalies qui peuvent être catégorisées. Cependant, la nature changeante et la variété des procédés de fabrication conduisent souvent à l'apparition fréquente de nouvelles anomalies.
- Les approches *non-supervisées*. Ces techniques ont recours à des algorithmes d'apprentissage incrémental (algorithmes des  $K$ -means) qui permettent de construire automatiquement et progressivement une base d'apprentissage à partir de données déjà traitées.

Les deux approches sont limitées : la première ne peut pas détecter les nouvelles anomalies et la seconde requiert généralement une constante mise à jour de son profil de normalité en collectant des données d'apprentissage, ce qui est parfois coûteux et difficile à réaliser dans le cadre industriel. En pratique, on constate qu'une majorité des travaux portant sur la détection des anomalies d'aspect est concentrée sur la recherche d'anomalies prédéfinies parmi la variété d'anomalies connues. La question d'une méthode générique et automatisée du processus d'inspection visuelle reste donc ouverte et notre étude a pour objectif d'y apporter des éléments de réponse.

Nous montrons la faisabilité d'une estimation des similarités/dissimilarités d'aspect à partir de l'information acquise (cf. chapitres 2 et 3). L'idée est de concevoir une chaîne de traitement qui définit les ressemblances entre les surfaces de luminance modélisées. Il est possible, de par la nature géométrique des surfaces de luminance, de supposer qu'il existe des similitudes de forme. Leur géométrie est une indicatrice de la répartition de la luminance réfléchiée en chaque point (pixel) de la surface. Cette géométrie est codée par le spectre modal (histogramme des amplitudes  $\lambda_i$ ) obtenu selon le principe de la Décomposition Modale Discrète. L'approche proposée consiste alors à rechercher une signature du comportement lumineux moyen de la surface en comparant les spectres modaux obtenus, afin d'indiquer à quel point les éléments correspondants sont similaires. La principale difficulté concerne l'invariance de la représentation modale aux rotations, en effet il est essentiel que cet espace de description ne soit pas affecté par le positionnement et l'orientation de la surface sous la caméra (figure 4.1), ou par une texturation de la surface (cas des surfaces fortement anisotropes) afin de garantir la robustesse de l'approche.

La problématique liée à l'invariance de la représentation modale est décrite dans la section 4.2. Le principe permettant le passage du spectre modal initial vers une représentation indépendante de l'orientation de la surface de luminance modélisée est présentée dans la section 4.3. Le paramétrage des invariants est appliqué à plusieurs échantillons afin de présenter sa mise en œuvre et ses avantages dans le cadre d'une



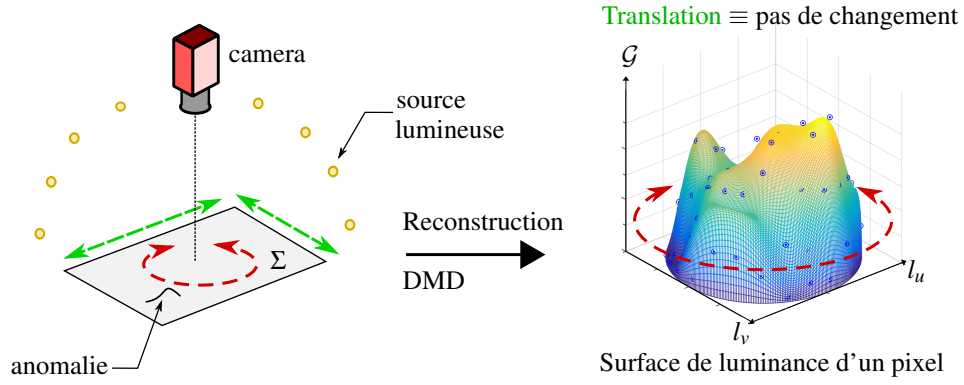


FIGURE 4.1 – Transformation de la surface de luminance d'un pixel dans l'espace  $(l_u, l_v, \mathcal{G})$  induite par une rotation de la surface  $\Sigma$  sous la caméra

estimation des similarités d'aspect des surfaces. Une chaîne de traitement (section 4.4) est proposée dans le but de localiser les régions les plus éloignées du comportement lumineux moyen de la surface par un calcul de distance adapté (analyse multi-variée). La mise en évidence des écarts d'aspect permet d'appréhender la problématique liée à l'identification et à la caractérisation des anomalies d'aspect. La fin de ce chapitre (section 4.5) est consacrée à l'évaluation des anomalies d'aspect. Cette étude permet de proposer des attributs robustes sur lesquels les contrôleurs pourront se baser pour décider de la conformité d'une surface.

## 4.2 Problématique liée à la mesure de similarité

Le but est de s'affranchir des conditions de posage de la pièce pour l'estimation de la similarité d'aspect car le recalage des données peut devenir une procédure contraignante dans le contexte industriel. Le but de ce chapitre est de montrer comment obtenir une représentation modale indépendante de l'orientation de la surface de luminance. Dans la littérature, on trouve plusieurs techniques de classification de texture dans les images 2D qui sont présentées comme étant invariants à la rotation d'images [Cohen 91, Mao 92, Porter 97]. Les fonctions sont calculées directement à partir d'une seule image et testées en utilisant des images auxquelles ils font effectuer des rotations. Si tout point de la surface se comporte comme une surface Lambertienne (parfaitement diffusante) ou si l'illumination n'est pas directionnelle mais directement normale en tout point de la surface, alors l'invariance de ces techniques à la rotation des surfaces est conservée.

Cependant dans la plupart des cas associés aux surfaces réelles, la texture surfacique produit des images qui diffèrent significativement de celles obtenues en faisant simplement tourner l'image. Par exemple, deux acquisitions RTI d'un échantillon issue de l'horlogerie (maillon de bracelet de montre) sont réalisés en appliquant une rotation de  $90^\circ$  à la pièce entre les deux mesures. Les images du maillon associées à trois directions d'éclairage particulières du dispositif d'acquisition sont données dans la figure 4.2 en fonction de son orientation sous la caméra. Pour une direction d'éclairage donnée, l'apparence de la surface du maillon va varier avec l'orientation de la pièce. L'interaction de la lumière avec la surface met en évidence des anomalies d'aspect différentes. Cela traduit le fait que la rotation d'une image n'est pas équivalente à la rotation de la surface. Quelques rares travaux [Smith 99a, Leung 01, Wu 03, Drbohlav 05] posent les bases de ce problème pour la classification et la reconnaissance automatiques de texture surfacique. On peut citer

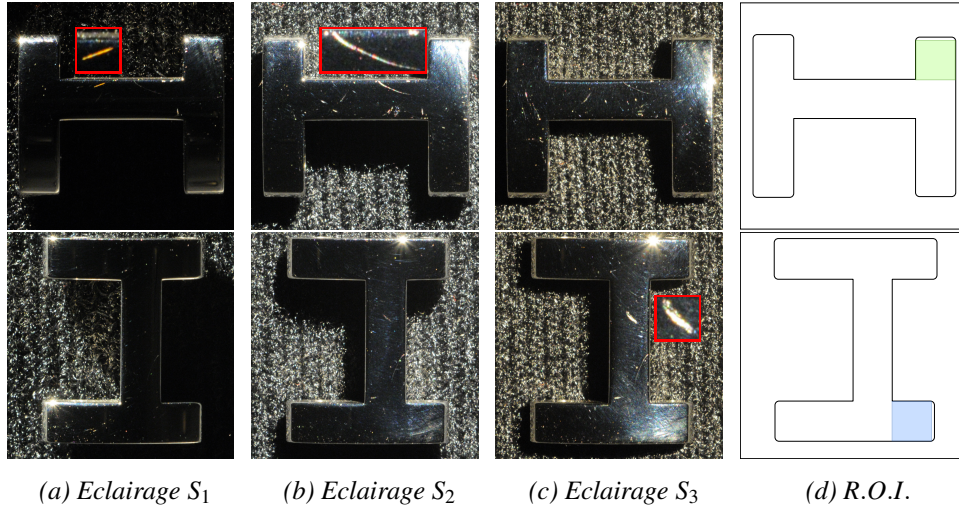


FIGURE 4.2 – Vues globales et anomalies extraites en rouge d'un maillon poli de bracelet de montre

également les utilisations [Kazhdan 03, Mak 08] de la transformée en Harmoniques Sphériques (notées HS) qui présente des propriétés intéressantes d'invariance pour l'indexation et la recherche par similarité d'objets 3D.

L'approche proposée ici consiste à modifier le paramétrage modal afin d'obtenir un espace de description invariant à la rotation. Le principe de la méthode est expliqué dans la section 4.3. Cette méthode sera testée sur l'acquisition du maillon pour montrer la pertinence du changement de paramétrage. Pour cela, une région sur la surface du maillon (figure 4.2d) est choisie dans le but de montrer l'efficacité de la méthode en évitant une procédure d'appariement de pixels. Un spectre modal moyen est calculé à partir de l'ensemble des spectres modaux associés aux pixels appartenant à la région, pour les deux configurations spatiales de la pièce. Les spectres modaux moyens obtenus sont visuellement différents (figure 4.3a). La mesure de la corrélation linéaire entre les deux spectres (figure 4.3b) montre l'incapacité de la représentation modale à traduire la similarité d'aspect de la région considérée (coefficient de corrélation  $R^2 = 0.28$  et un écart-type résiduel  $S_1 = 0.08$ ).

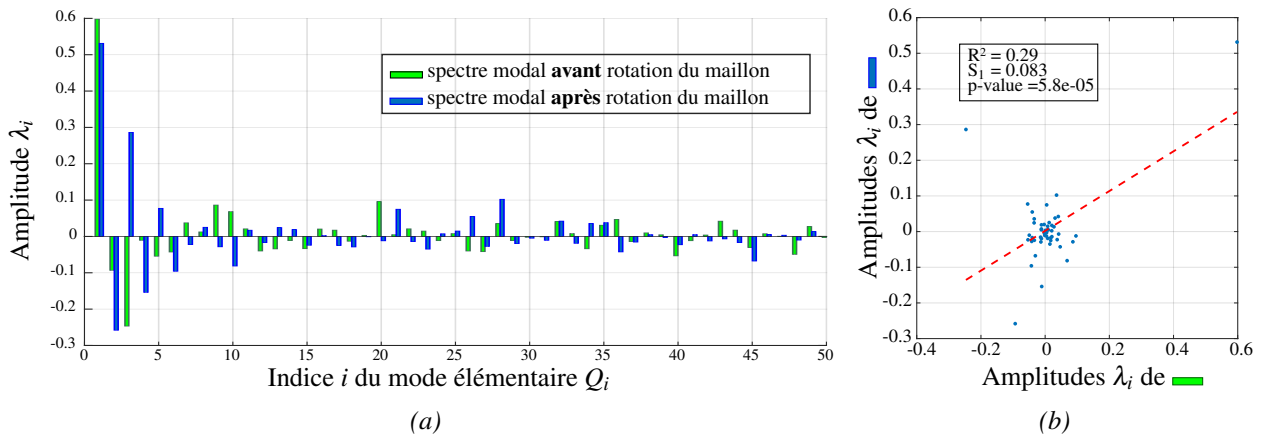


FIGURE 4.3 – Maillon : Spectres modaux (a) des amplitudes  $\lambda_i$  et (b) le résultat de la corrélation linéaire entre régions

### 4.3 Paramétrage modal invariant à la rotation

#### 4.3.1 Principe

Les propriétés géométriques des modes de la base modale naturelle permettent d'identifier deux types de modes :

- des **modes simples** : ces modes possèdent une symétrie orthogonale qui laisse leur géométrie invariante par toute rotation d'axe vertical (ex :  $Q_1, Q_6, Q_{15}$  représentés dans la figure 4.4),
- des **modes congruents** : la base modale naturelle génère des couples de mode avec un déphasage angulaire.

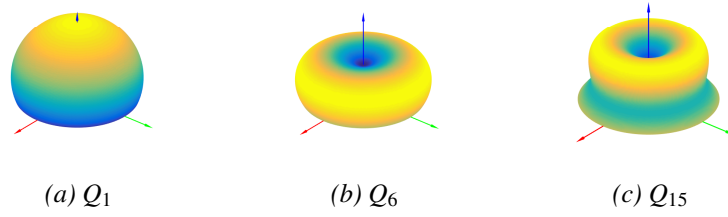


FIGURE 4.4 – Modes simples de la base naturelle

Le principe consiste à séparer l'information d'amplitude de l'information de phase, i.e. l'information liée à l'orientation de la surface de luminance autour de l'axe vertical du repère local  $(l_u, l_v, \mathcal{G})$ . En pratique, nous dissociions le spectre modal en deux paramètres liés à un paramètre d'amplitude et à un paramètre de phase. Pour les modes congruents, le passage de la base modale naturelle vers la représentation modale invariante à la rotation est illustré sur la Figure 4.5. L'amplitude et la phase résultantes (resp.  $\lambda'_j$  et  $\alpha'_j$ ) sont calculées à partir de l'équation qui définit la combinaison linéaire d'un couple de modes  $Q_i$  et  $Q_{i+1}$  pondérés de leurs contributions modales  $\lambda_i$  et  $\lambda_{i+1}$ , avec leurs paramètres de phase  $\alpha_i$  et  $\alpha_{i+1}$ .

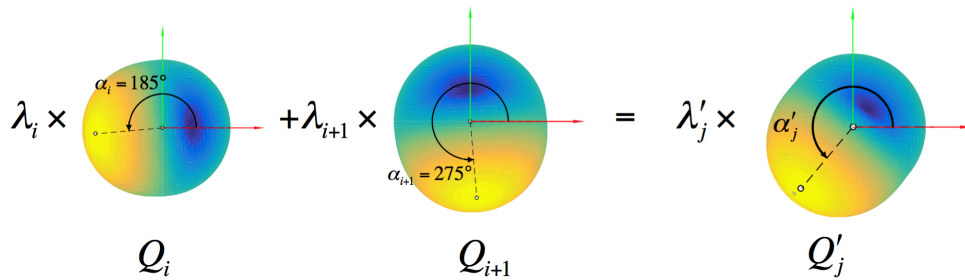


FIGURE 4.5 – Changement de paramétrage pour les paires de modes

Le paramètre d'amplitude résultant  $\lambda'_j$  est obtenu en calculant la norme L2 à partir des contributions modales  $\lambda_i$  et  $\lambda_{i+1}$  du couple de modes  $Q_i$  et  $Q_{i+1}$ .

$$\lambda'_j = \sqrt{\lambda_i^2 + \lambda_{i+1}^2} \quad (4.1)$$

Les normes L2 exprimées ne changent pas lorsque la fonction de luminance est mise en rotation autour de l'axe vertical du repère local  $(l_u, l_v, \mathcal{G})$ . L'amplitude résultante  $\lambda'_j$  est par conséquent invariante par rotation autour de l'axe vertical. Un corollaire est que deux surfaces de luminance symétriques sont considérées identiques étant donné que leur amplitudes sont les mêmes. La séparation des informations de phase permet de rendre l'espace modal obtenu invariant en rotation.

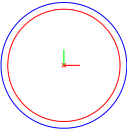
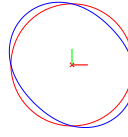
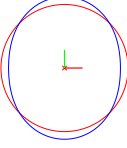
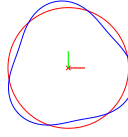
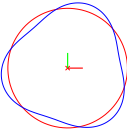
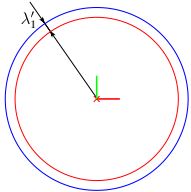
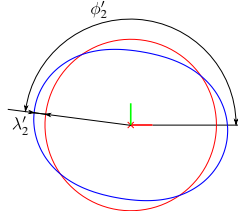
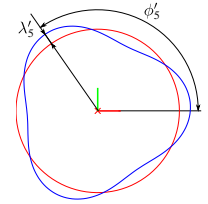
$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	....	$Q_7$	$Q_8$
					
$Q'_1$	$Q'_2$	....	$Q'_5$		
$\lambda_1 Q_1$	$\lambda_2 Q_2 + \lambda_3 Q_3$		$\lambda_7 Q_7 + \lambda_8 Q_8$		
					
$\lambda'_1$	$(\lambda'_2, \alpha'_2)$		$(\lambda'_5, \alpha'_5)$		

 TABLE 4.1 – *Changement de paramétrage*

La phase  $\alpha'_j$  du mode peut être retrouvée par la relation suivante :

$$\alpha'_j = \alpha_i + \arctan \frac{\lambda_{i+1} \sin \phi_j}{\lambda_i + \lambda_{i+1} \cos \phi_j} \quad \text{avec} \quad \phi_j = \alpha_{i+1} - \alpha_i \quad (4.2)$$

L'orientation  $\alpha_i$  des modes de la base naturelle est calculée en amont. Nous avons choisi de calculer l'angle entre l'axe  $x$  du repère et le premier maximum (figure 4.1). Une fois le calcul des angles  $\alpha_i$  effectué, on retient définitivement ces angles avec les données de la base modale. L'ensemble de modes de la base naturelle est donnée en annexe A.2 avec les modes appariés et les angles  $\alpha_i$  associés.

### 4.3.2 Invariance à l'orientation de la surface

Le nouveau paramétrage consiste donc à remplacer l'ensemble des amplitudes  $\lambda_i$  par un nouvel ensemble réduit d'amplitudes  $\lambda'_j$ , construit à partir de l'ensemble initial des amplitudes, afin d'obtenir une représentation modale des surfaces de luminance qui soient invariantes à la rotation. Le changement de paramétrage est appliqué sur les spectres modaux moyens précédemment obtenus sur le maillon de montre auquel on a fait subir une rotation. Les spectres modaux moyens des amplitudes  $\lambda'_j$  associés à la même région sur la surface mais orientée différemment sont donnés dans la figure 4.6a. On observe (figure 4.6b) que les spectres modaux obtenus sont visuellement très proches à travers la mesure de corrélation linéaire (amélioration du coefficient de corrélation et diminution de l'écart-type).

L'écart-type résiduel a sensiblement diminué du fait du changement de paramétrage. Nous proposons d'avoir la preuve statistique que la diminution constatée est bien significative, et non due à l'interaction entre les modes et à la variance résiduelle aléatoire (la variance non expliquée par le nouveau paramétrage) à l'aide du test statistique de Fisher. Ce test d'hypothèse statistique permet, en faisant le rapport des deux variances, et en vérifiant que ce rapport ne dépasse pas une certaine valeur seuil que l'on cherche dans la table de Fisher (ou table de Snedecor), de tester l'égalité des deux variances. Le ratio des écarts-types résiduels donne  $S_1/S_2 = 0.08/0.04 = 2$ , avec  $(n_1 - 2)$  degrés de liberté au numérateur et  $(n_2 - 2)$  degrés de liberté au dénominateur. Ce rapport est à comparer à la valeur seuil lue dans la table de Fisher  $F(v_1, v_2)$

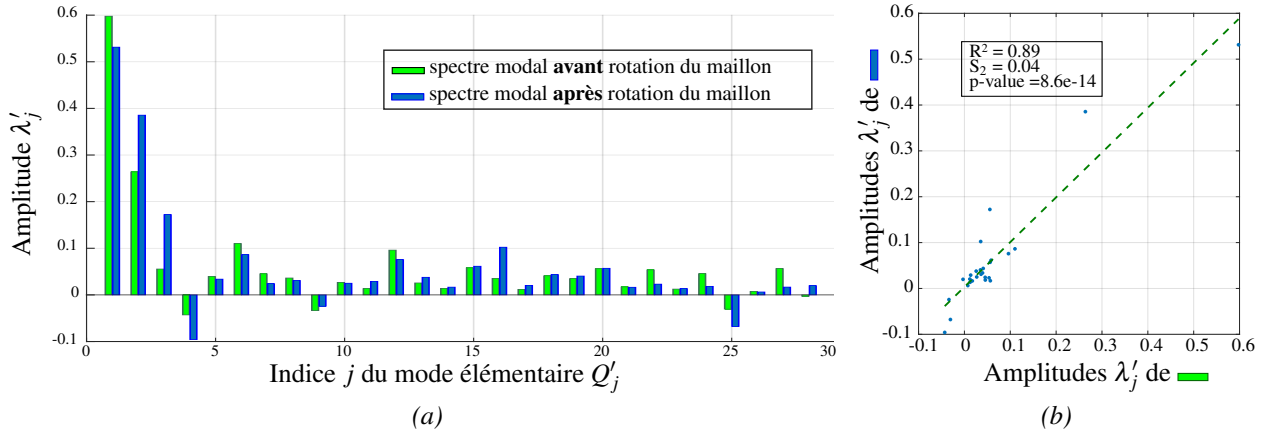


FIGURE 4.6 – Maillon : Spectres modaux des amplitudes  $\lambda'_j$  et la mesure (b) de la corrélation linéaire entre les régions de pixels

avec un taux de confiance à 95% où  $v_1$  et  $v_2$  sont les degrés de liberté du numérateur et du dénominateur, soit  $F(48,26) = 1.20$ . L'écart des variances est donc très significatif avec un risque unilatéral  $\alpha$  estimé à 2.4% : nous avons donc la preuve statistique d'avoir amélioré la corrélation linéaire entre le spectre modal des zones similaires de pixel sur la surface du maillon tourné, en modifiant le paramétrage.

### 4.3.3 Invariance à l'anisotropie de la texture

L'analyse de l'isotropie d'une surface permet d'avoir une bonne indication sur son rendu visuel global. En effet, plus une surface est isotrope (pas de sens de texture prépondérant), plus elle aura tendance à diffuser le lumière de façon équivalente dans toutes les directions d'observation. A l'inverse, une surface fortement anisotrope aura un rendu visuel très dépendant des conditions d'illumination et d'observation. Les différences d'orientation d'un motif sur la surface devraient directement faire tourner d'un certain angle les surfaces de luminance décrivant le motif. Ces changements d'orientation d'un motif causent des différences radicales d'apparence entre différentes régions de la surface pour un même angle d'observation, et ne doivent pas être interprétés comme des variations locales et non désirables de l'aspect de surface par l'agorithme de mesure de similarité.

La figure 4.7 montre un exemple d'une surface identifiée par *Surf-1* où les textures sont « polaires », c'est-à-dire orientées selon les rayons du disque. Ce type de surfaces présente un comportement visuel très dépendant du sens d'observation et d'éclairage. Nous pouvons prévoir que la forme des surfaces de luminance sera sensiblement la même à un déphasage près pour les points distribués sur un même arc de cercle de la surface. La figure 4.7 permet de conforter cette hypothèse si nous comparons visuellement les surfaces de luminance approximées par l'approche DMD aux pixels indiqués sur la surface. On observe une transformation qui fait tourner d'un certain angle la surface de luminance des deux points distincts ■ et ● (figures 4.7 et 4.7) dans le plan  $(l_u, l_v)$  (figures 4.7 et 4.7). Cependant, la forme des surfaces de luminance est invariante.

Comme nous pouvions l'attendre, les spectres modaux des amplitudes  $\lambda_i$  (figure 4.8a) associées aux pixels considérés ne montrent pas cette similitude. La détermination d'un comportement lumineux moyen de la surface du soleillage n'est pas réalisable à partir des amplitudes modales exprimées dans la base naturelle. Nous appliquons le paramétrage des invariants afin d'obtenir une corrélation entre les contributions modales des pixels. La perte de l'information de phase est pertinente dans ce cas où nous recherchons une invariance des descripteurs vis-à-vis de l'anisotropie de la surface. Les résultats du passage dans l'espace d'invariance sont données dans la figure 4.8c où les nouveaux spectres des deux pixels montrent une certaine

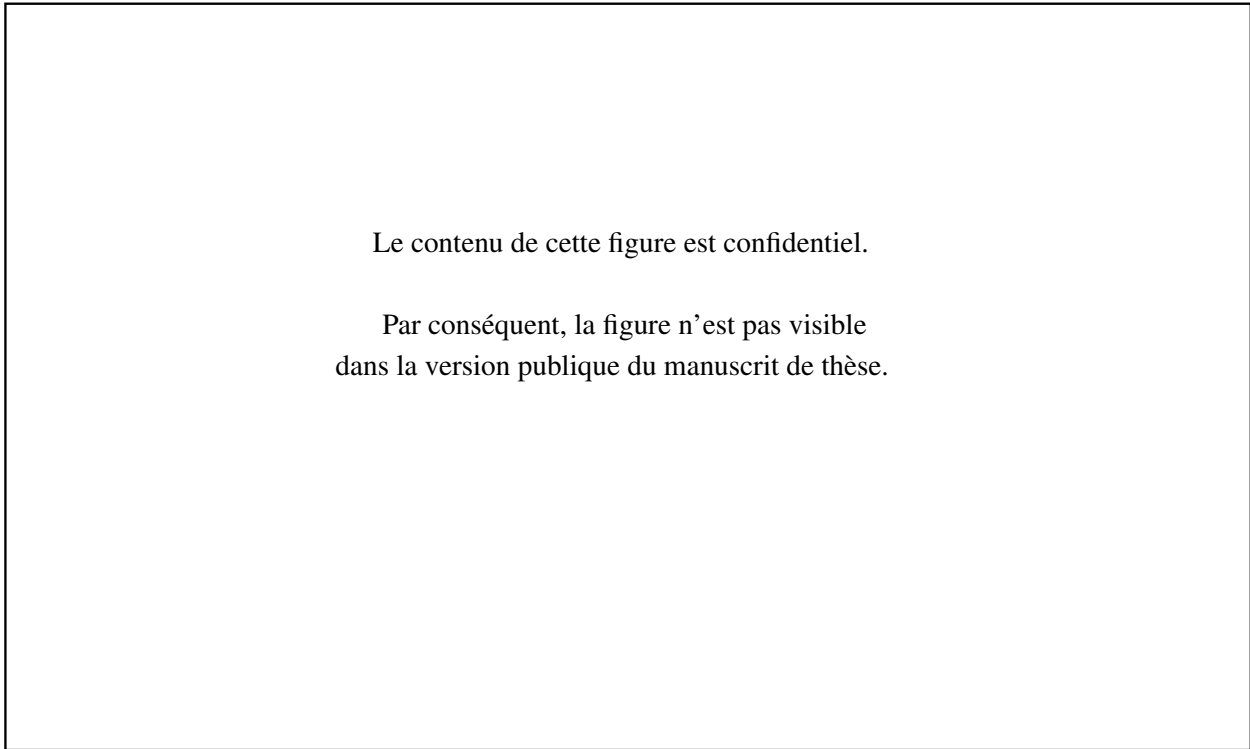


FIGURE 4.7 – Surf-1 : acquisition et reconstruction DMD pour une texturation « polaire » de surface

similarité des amplitudes  $\lambda'_j$ . Le coefficient de corrélation est meilleur suite au changement de paramétrage comme on peut l'observer en comparant les résultats des graphes de corrélation linéaire des figures 4.8b et 4.8d. Similairement au cas du maillon, nous proposons de vérifier que l'écart-type résiduel a sensiblement diminué du fait du changement de paramétrage. Pour avoir la preuve statistique que la diminution constatée des écarts-types résiduels est bien significative, nous appliquons le test statistique de Fisher. Ainsi le ratio  $0.071/0.026 = 2.72$  est à comparer à la valeur seuil lue dans la table de Fisher  $F(v_1, v_2)$  avec un taux de confiance à 95% où  $v_1$  et  $v_2$  sont les degrés de liberté du numérateur et du dénominateur, soit  $F(48, 26) = 1.20$ . L'écart est très significatif avec un risque  $\alpha$  inférieur à 1%, nous avons donc la preuve statistique d'avoir amélioré la corrélation linéaire entre le spectre modal des deux pixels en opérant le changement de paramétrage.

### Discussion des résultats

Le bien-fondé des tests, la pertinence des hypothèses à opposer peuvent être discutés. On peut par exemple comparer plutôt les corrélations des valeurs absolues de la représentation modale naturelle car le changement de signe des amplitudes  $\lambda_i$  intervient dans le changement d'orientation que subisse les modes. Par voie de conséquence, les signes influent fortement sur les résultats statistiques (coefficient de corrélation  $R^2$  et variance  $S$ ) dans le cas de la représentation modale naturelle. De plus, on constate que les spectres modaux obtenus dans les deux représentations ont une tendance en  $1/n$  qui suggèrent un ajustement de ces données par une régression logarithmique. Pour affiner et compléter l'analyse, nous donnons donc dans la figure 4.9 les résultats en opérant une transformation logarithmique des amplitudes  $\lambda'_j$  et des amplitudes absolues  $|\lambda_i|$ . Les tests de Fisher calculés à partir des résultats des corrélations logarithmiques montrent également que le changement de paramétrage permet d'améliorer significativement l'association des surfaces de luminance symétriques. Cette représentation modale invariante à la rotation permet donc d'envisager de quantifier les similitudes d'aspect d'une surface. Nous constatons par ailleurs que de meilleurs résultats de

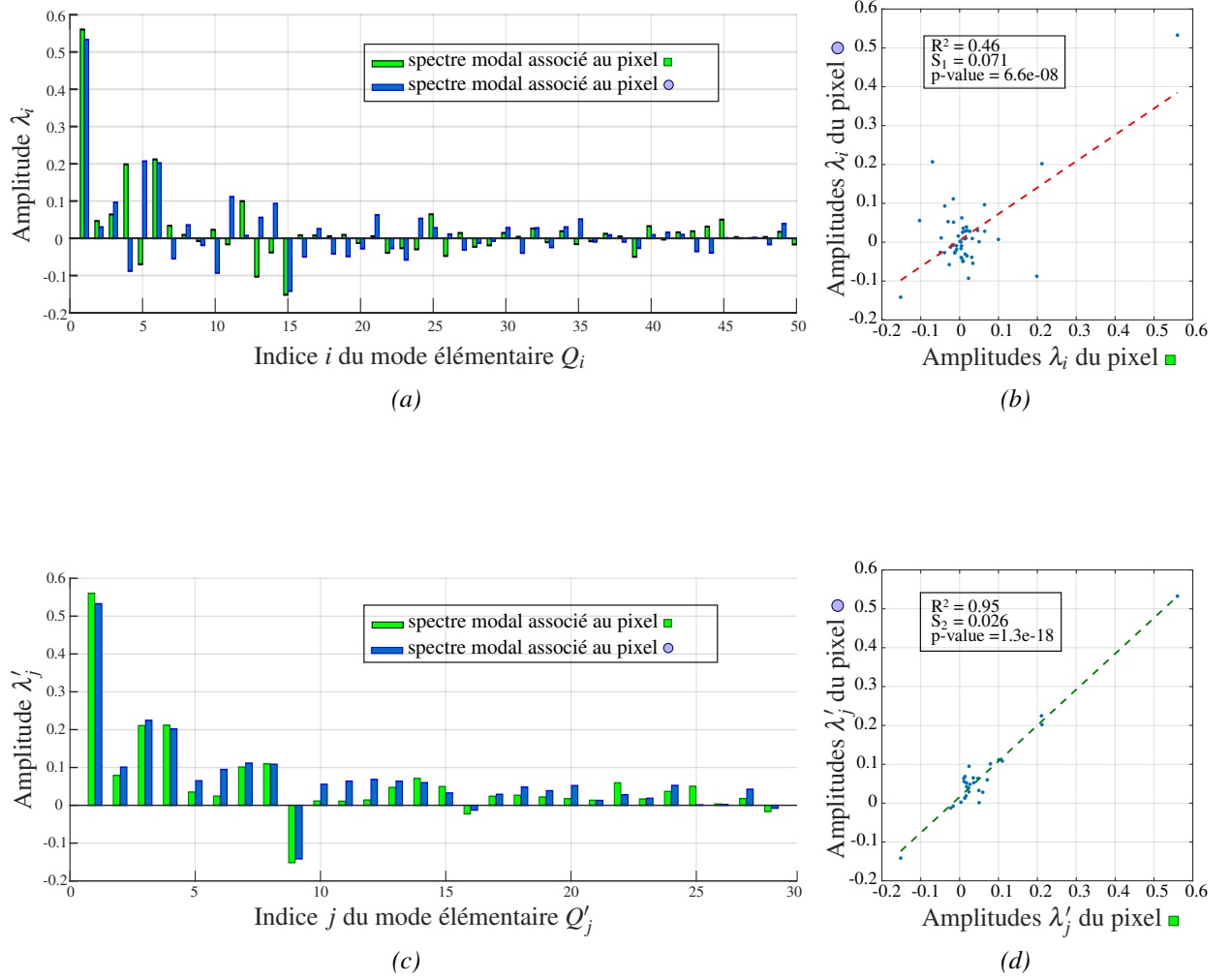


FIGURE 4.8 – Surf-1 : Spectres modaux (a) des amplitudes  $\lambda_i$  et (c) des amplitudes  $\lambda'_j$ , et les résultats (b) et (d) de la corrélation linéaire entre pixels



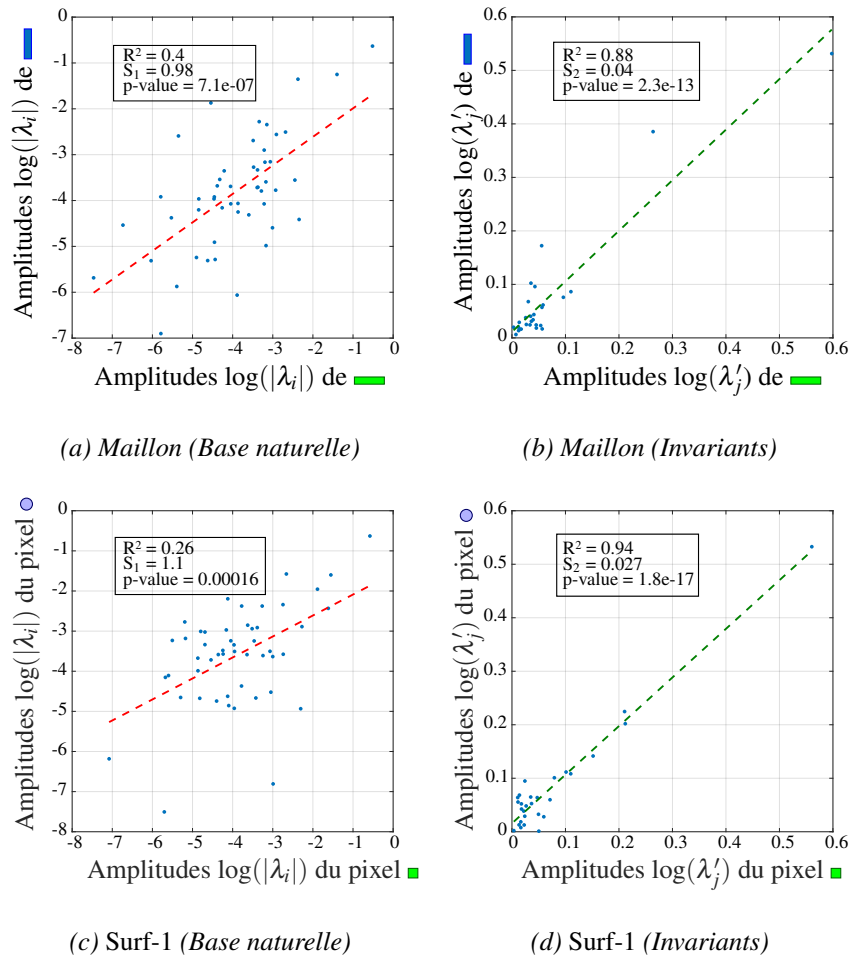


FIGURE 4.9 – Résultats des corrélations logarithmiques

mesure de corrélation linéaire sont obtenus entre les deux pixels de la surface « polaire » *Surf-1* en comparaison avec les résultats entre les deux régions du maillon auquel on a fait subir une rotation. Cela peut s'expliquer par des causes en lien avec les conditions d'acquisition. En effet, une des principales sources de variance est liée au fait que la surface ne « voit » pas le même maillage selon son orientation sous la caméra car la répartition des sources lumineuses bien qu'elle soit homogène, ne « tourne » pas de manière identique avec la surface. De manière similaire, un mauvais centrage de la direction des éclairages peut être considérée comme une cause de dispersion. Dans ce sens, nous avons proposé dans le chapitre 2 un système d'alignement des sources lumineuses afin d'ajuster finement les directions des faisceaux des LEDs à l'aide de 3 vis de réglage qui assurent cette fonction sur chaque module d'éclairage.

## 4.4 Mesure de similarité de l'aspect des surfaces

Le nouveau paramétrage utilisé transformant les amplitudes  $\lambda_i$  en leur invariant en rotation  $\lambda'_j$  permet de réduire la dimensionnalité des données modales à analyser. Il permet un gain de compacité significatif en préservant l'information utile. Aussi, nous allons voir comment les propriétés d'invariance de la nouvelle représentation permet d'isoler les anomalies d'aspect du reste de la surface grâce à un simple calcul de distance. Ce paramétrage permet d'évacuer complètement la complexité de l'algorithme de segmentation à mettre en œuvre pour isoler efficacement des caractéristiques recherchées sur la surface.

### 4.4.1 Distance de Mahalanobis

L'objectif est de regrouper un ensemble d'amplitudes  $\lambda'_j$  décrivant les surfaces de luminance de la manière la plus naturelle possible. La dissimilarité des surfaces de luminance peut être estimée par une fonction calculant la distance entre leur spectre modal respectif. Pour mieux comprendre l'approche utilisée, nous nous ramenons à un cas plus simple de calcul de distance entre des données à deux variables, que nous généraliserons ensuite à l'analyse multivariée des amplitudes modales.

Considérons un point dont on souhaite estimer la probabilité d'appartenance à un ensemble donné. La première étape serait de trouver le centre de gravité du nuage de points. Intuitivement, plus le point en question est proche du centre de gravité, plus il est susceptible d'appartenir à l'ensemble. Pour cela, nous avons besoin de savoir comment les points de mesure sont répartis. L'approche la plus simple est d'estimer l'écart-type des distances entre les points et le centre de gravité. Si la distance entre le point considéré et le centre de gravité est inférieure à un écart-type, alors nous pourrions en conclure qu'il est hautement probable que ce point appartienne à l'ensemble. Cette approche peut être réalisée en définissant la distance normalisée entre le point et l'ensemble des points du nuage, soit :  $(x - \mu)/\sigma$ . En utilisant par exemple les tables de la loi normale, nous pouvons alors déduire la probabilité que le point appartienne à l'ensemble. L'inconvénient de cette approche est d'avoir supposé que les points sont répartis de façon circulaire autour du centre de gravité auquel cas la distance euclidienne est adaptée. Dans le cas d'une distribution non-circulaire, par exemple ellipsoïdale, nous nous attendons alors à ce que la probabilité ne dépende pas seulement de l'éloignement du point au centre de gravité, mais également de la direction associée. Dans les directions où l'ellipsoïde a un axe court, le point doit être plus proche du centre de gravité, tandis que ceux le long de l'axe long peuvent être plus loin du centre de gravité, pour appartenir à l'ensemble.

L'ellipsoïde qui représente le mieux la distribution de probabilité de l'ensemble peut être estimée par la construction de la matrice de covariance des échantillons. La distance de Mahalanobis [Mahalanobis 36] est simplement la distance entre le point et le centre de gravité divisée par la largeur de l'ellipsoïde dans

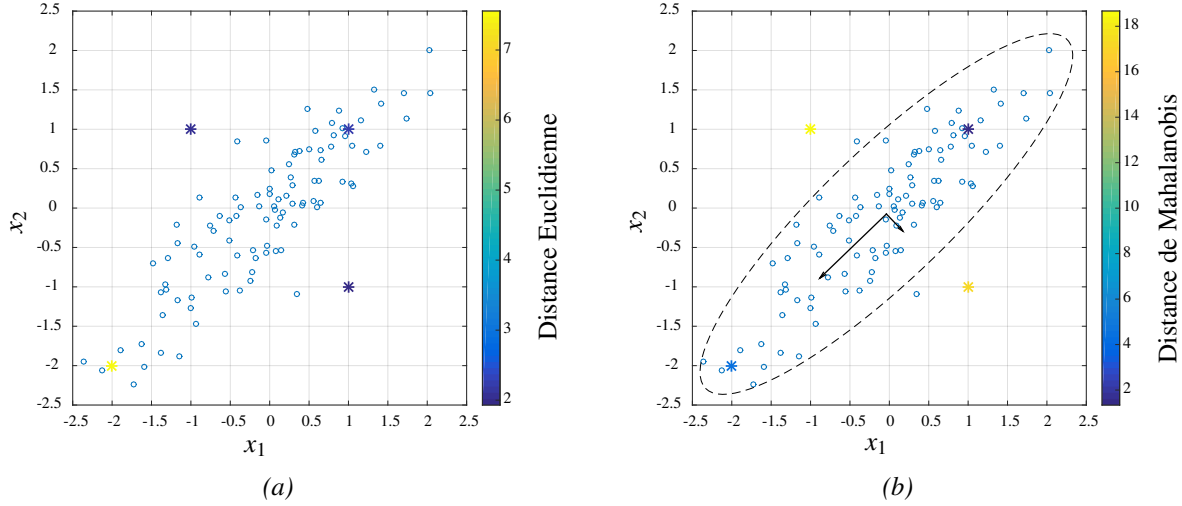


FIGURE 4.10 – Comparaison de la distance Euclidienne (a) et de Mahalanobis (b)

la direction du point considéré (figure 4.10b). Mathématiquement, la distance de Mahalanobis d'une observation  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)^T$  d'un ensemble d'observations de moyennes  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_p)^T$  et de covariances  $\Sigma$  est donnée par la relation suivante :

$$D_M = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)} \quad (4.3)$$

Généralement, l'ellipse de tolérance est définie comme les observations  $x$  de dimension  $p$  dont la distance de Mahalanobis  $D_M$  équivaut à  $\sqrt{\chi_{p,0.975}^2}$ , où  $\chi_{p,\alpha}$  désigne le  $\alpha$ -quantile de la distribution  $\chi_p^2$ . La figure 4.10 montre les différences de résultats observables entre le calcul de la distance Euclidienne et de la distance de Mahalanobis calculées sur les mêmes points pour tester leur appartenance au nuage de points donné. Ainsi, les observations signalées par des étoiles avec des valeurs de coordonnées égales,  $(1, 1)$  et  $(-2, -2)$ , sont significativement plus proches des autres observations dans la distance de Mahalanobis que les observations avec des valeurs de coordonnées opposées,  $(-1, 1)$  et  $(1, -1)$ , tandis que les observations sont à peu près équidistantes du centre de gravité du nuage dans la distance euclidienne. En synthèse, la distance de Mahalanobis tient compte de la variance des données et les différentes échelles entre les variables et leurs corrélations, elle est par conséquent utilisée dans de nombreux travaux dans le but de classer des observations dans leurs groupes prévus. On la retrouve donc naturellement dans la mise en œuvre de systèmes d'inspection [Boukouvalas 98, Gruna 11, Gruna 12, Furferi 13].

Appliquée aux données modales, la distance de Mahalanobis s'écrit :

$$D_M = \sqrt{(\Lambda' - \mu)^T \Sigma^{-1} (\Lambda' - \mu)} \quad (4.4)$$

où  $\Lambda' = (\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \dots, \lambda'_j)^T$  est le vecteur modal (histogramme des amplitudes invariantes à la rotation) qui décrit la surface de luminance au point où la distance est calculée. Les moyennes  $\mu$  et les covariances  $\Sigma$  sont estimées à partir des amplitudes modales invariantes associées à l'ensemble des pixels de la pièce ou des zones de la surface à inspecter. Ces estimateurs classiques peuvent être calculés soit à chaque nouvelle acquisition, soit sur une pièce référence d'un lot de pièces identiques.

#### 4.4.2 Mise en œuvre pour la détection des anomalies

Afin d'évaluer les performances de la technique, nous appliquons la méthode sur des échantillons (palets) sur lesquels des rayures à la topographie maîtrisée (dimensions et profil connus) ont été engendrées.

<i>Echantillon</i>	<i>Chargement</i>	<i>Géométrie</i>			<i>Visibilité</i>
Numéro	F (μN)	$L_b$ (μm)	$L_s$ (μm)	$p$ (nm)	(%)
E1	1850	1.25	0.75	58.32	64.6
E2	1200	0.98	0.61	43.57	14.5
E3	800	0.68	0.44	26.1	0

$L_b$  : largeur entre deux bourrelets.  $L_s$  : largeur au niveau de la surface.  $p$  : profondeur.

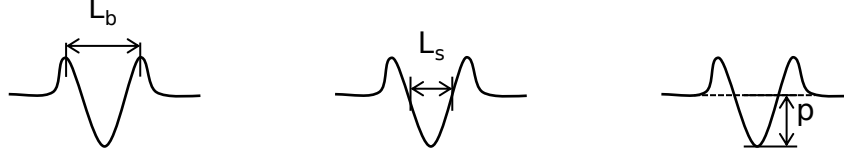


TABLE 4.2 – Caractéristiques des rayures à la topographie maîtrisée, selon [Puntous 13a]

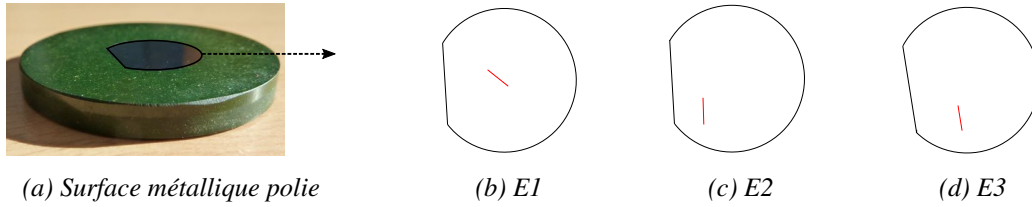


FIGURE 4.11 – Emplacement des rayures sur les échantillons

Ces pièces ont été réalisées dans le cadre des travaux de doctorat de Théodore Puntous [Puntous 13b], au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) au moyen d'un nano-indenteur et une pointe diamant. La création de ces rayures est destinée à générer les stimuli de l'étude psychophysique menée dans une entreprise de polissage. Les résultats de l'analyse sensorielle ont permis de déterminer les limites de visibilité (détection) des rayures en les soumettant à un panel de contrôleurs qualité [Puntous 13a]. Les résultats en terme de visibilité sont synthétisés dans le tableau 4.2. Les rayures calibrées ont été positionnées et orientées différemment sur chaque échantillon pour limiter ainsi l'adaptation des sujets qui ont participé à la tâche de recherche visuelle. La figure 4.11 situe les rayures des trois échantillons considérés.

Les prises de vue des 3 échantillons sont réalisées dans les mêmes conditions d'acquisition. La chaîne de traitement automatique est exécutée conformément au diagramme de la figure 4.12. A partir des données stéréophotométriques, on calcule les amplitudes  $\lambda_i$  en appliquant le calcul de décomposition modale discrète comme présenté dans le chapitre 3. On obtient un spectre modal pour chaque pixel de l'image, auquel on applique le changement de paramétrage afin de séparer l'information de phase liée à l'orientation de la surface de luminance (les amplitudes  $\lambda'_j$  obtenues sont invariantes à la rotation). La dernière étape consiste à calculer la distance de Mahalanobis pour mettre en correspondance des aspects de surface similaire. Les valeurs très éloignées sont alors considérées comme des anomalies d'aspect qui peuvent tirer leur origine de différentes causes. Les résultats sont donnés dans la figure 4.13. Les cartographies de distance obtenues mettent en évidence la présence de plusieurs anomalies d'aspect sur la surface. La majorité tire leur origine de négligence lors des manipulations de la pièce offrant un cas d'étude intéressant. Les rayures calibrées se démarquent par leur forme rectiligne. Notre méthodologie réussit à partir des données modales à séparer efficacement les populations de pixel dont le comportement est éloigné du reste de la surface. Ces cartographies de distance peuvent être vue comme un prédicteur de l'attention visuelle à travers l'espace 3D  $(l_u, l_v, \mathcal{G})$ .

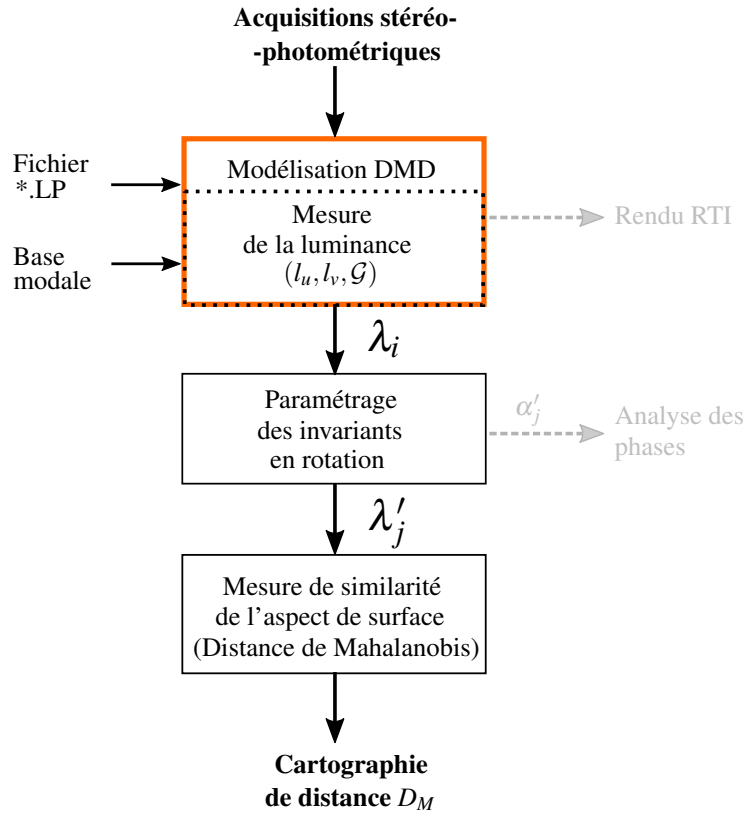


FIGURE 4.12 – Chaîne de traitement pour la mesure de similarité d'aspect

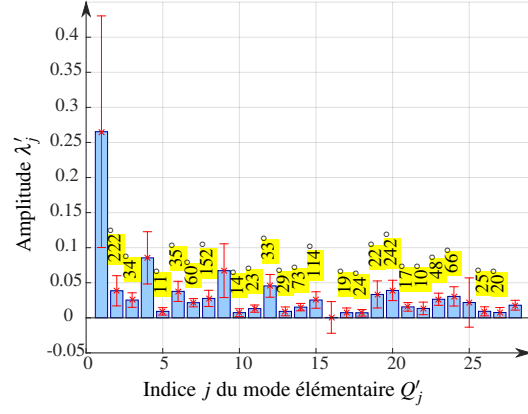
Toujours dans le but d'évaluer les performances de la méthode, nous confrontons ces résultats à ceux obtenus avec le modèle de saillance de Itti [Walther 06] présenté dans la section 1.1.4. Les algorithmes de la *Saliency Toolbox* développée sur Matlab sont conçus pour calculer une carte de saillance à partir d'une image. Comme le modèle a été testé initialement sur des photographies contenant des objets macroscopiques, les réglages de résolution sont assez faibles. Nous reprenons les paramètres utilisés dans l'étude de Clarke [Clarke 10] appliqués aux surfaces rugueuses. Ces paramètres 4.5 déterminent les différents niveaux d'échelle pour la construction de la pyramide des Gaussiennes :

$$\text{minLevel} = 1 \quad \text{maxLevel} = 4 \quad \text{maxDelta} = 3 \quad \text{mapLevel} = 2 \quad (4.5)$$

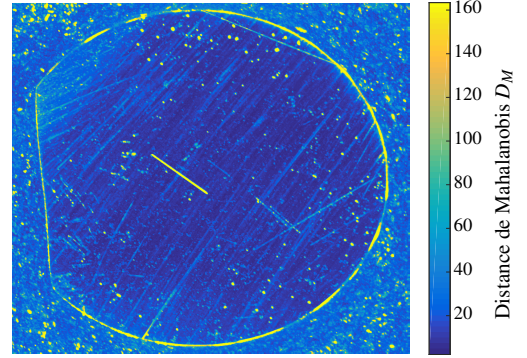
La procédure consiste à calculer la carte de saillance associée à chacune des images du lot d'acquisition RTI et à faire la somme pour obtenir une unique carte de saillance de la surface inspectée. Le codage couleur (colormap : *parula*) est conservé pour faciliter la comparaison des résultats entre le modèle de saillance et l'approche modale. Un seuillage à trois écarts-types des données a été nécessaire sur le résultat de la somme des cartes de saillance pour filtrer les valeurs très éloignées qui peuvent conduire à un effet dit de masque où les observations saillantes ne sont plus détectées comme telles. Les cartes de saillance obtenues sont données dans la figure 4.14.

### Discussion des résultats

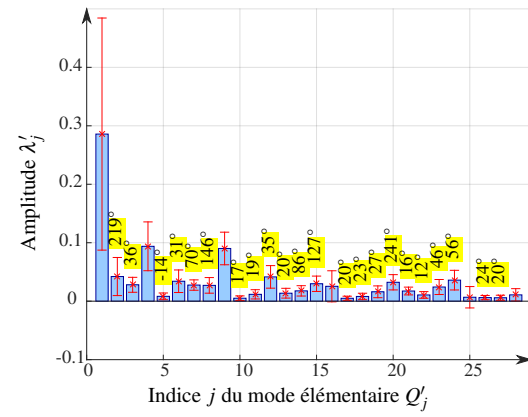
L'algorithme de Walther et Kosh calcule 42 cartes de descripteurs à partir des primitives de l'image originale qui contiennent chacune une partie de l'information de saillance (1 contraste + 4 orientations + 2 couleurs = 7 descripteurs, et 6 niveaux d'échelle de résolution sont utilisés, soit un total de 42 cartes). L'ensemble des 42 cartes est fusionné en utilisant un processus de normalisation itérative favorisant le rapport



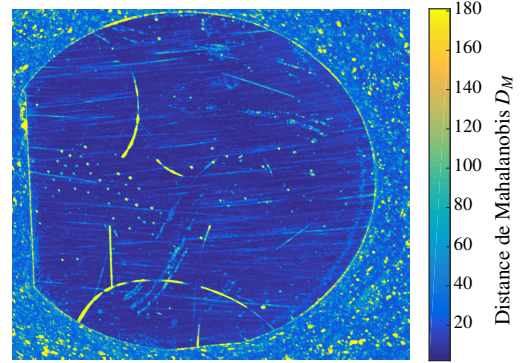
(a) Spectre modal moyen de E1



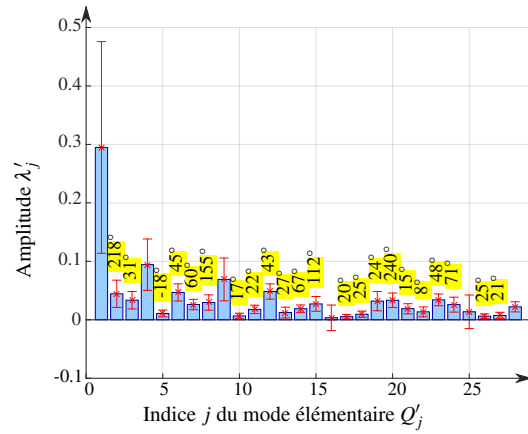
(b) Ecart d'aspect de E1



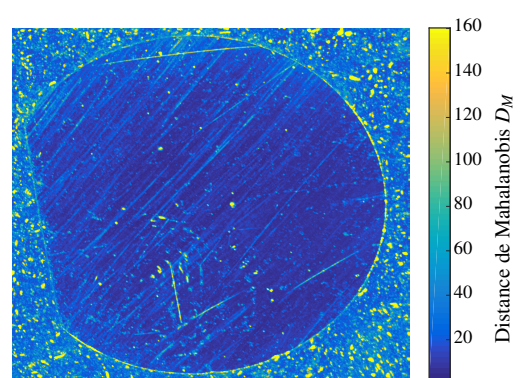
(c) Spectre modal moyen de E2



(d) Ecart d'aspect de E2



(e) Spectre modal moyen de E3



(f) Ecart d'aspect de E3

FIGURE 4.13 – Identification des anomalies d'aspect au moyen des cartographies de distance



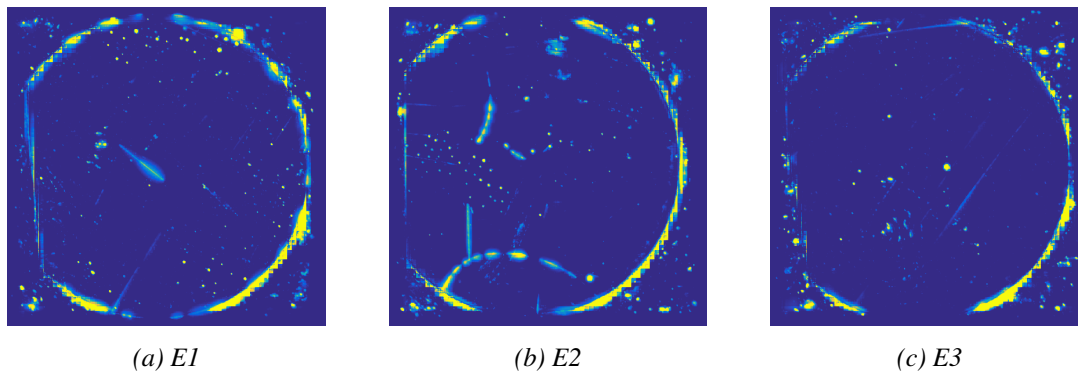


FIGURE 4.14 – Cartes de saillance obtenues au moyen de l'algorithme de Walther et Kosh

signal sur bruit, pour aboutir à une seule et unique carte de saillance associée à la direction d'éclairage de l'image originale. Finalement, cette séquence de calcul est appliquée aux  $m$  images associées aux directions d'éclairage du dispositif d'acquisition stéréophotométrique utilisé.

L'approche modale est moins complexe vis-à-vis de l'algorithme de saillance testé. Par conséquent, les temps de calcul sont significativement réduits. La définition du paramétrage modal invariant à la rotation favorise la compaction de l'information acquise et permet une analyse discriminante des données en terme d'apparence des surfaces. Pour donner un ordre de grandeur, les temps de calculs qui ont été nécessaires à l'obtention des cartes de saillance sont rassemblés dans le tableau 4.3. Les deux méthodes sont exécutées avec les mêmes données d'entrée et le même ordinateur (nombre d'images 96, taille des images : 1100x1100 pixels, processeur : 2.8 GHz Intel Core I7, Mémoire : 8 Go 1600Mhz DDR3). Les valeurs  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  correspondent à la durée complète moyenne de calcul par échantillon. L'approche modale est significativement plus rapide que l'algorithme de la *SaliencyToolbox*. Les temps d'exécution de l'approche modale peuvent être encore réduits en faisant une réécriture du programme développé sur Matlab en langage C qui fournit un code plus efficace, dans le but de répondre aux exigences parfois sévères d'un contrôle qualité industriel sur une chaîne de production.

	E1	E2	E3	
1 - Approche modale				
Chargement des images	5.9	5.7	5.9	} $\Delta t_1 = 15.7s$
DMD	0.5	1.0	0.6	
Changement de paramétrage	6.3	5.8	4.7	
Distance de Mahalanobis	3.5	3.9	3.3	
2 - Algorithme de saillance de Walter et Kosh				
Calcul des cartes de saillance	2947	2658	2710	$\rightarrow \Delta t_2 = 2771s$

TABLE 4.3 – Comparaison des temps de calcul (exprimés en secondes)

#### 4.4.3 Applications de la méthode sur plusieurs surfaces réelles

La figure 4.15 synthétise les résultats obtenus pour une variété de surfaces présentant des anomalies d'aspect. La forme des objets manufacturés devient de plus en plus complexe. Aujourd'hui, n'importe quelle forme peut être construite notamment grâce à la démocratisation des techniques d'imprimantes 3D ou à des process de fabrication de hautes précisions telles que les machines multi-axes. Par ailleurs, les matériaux

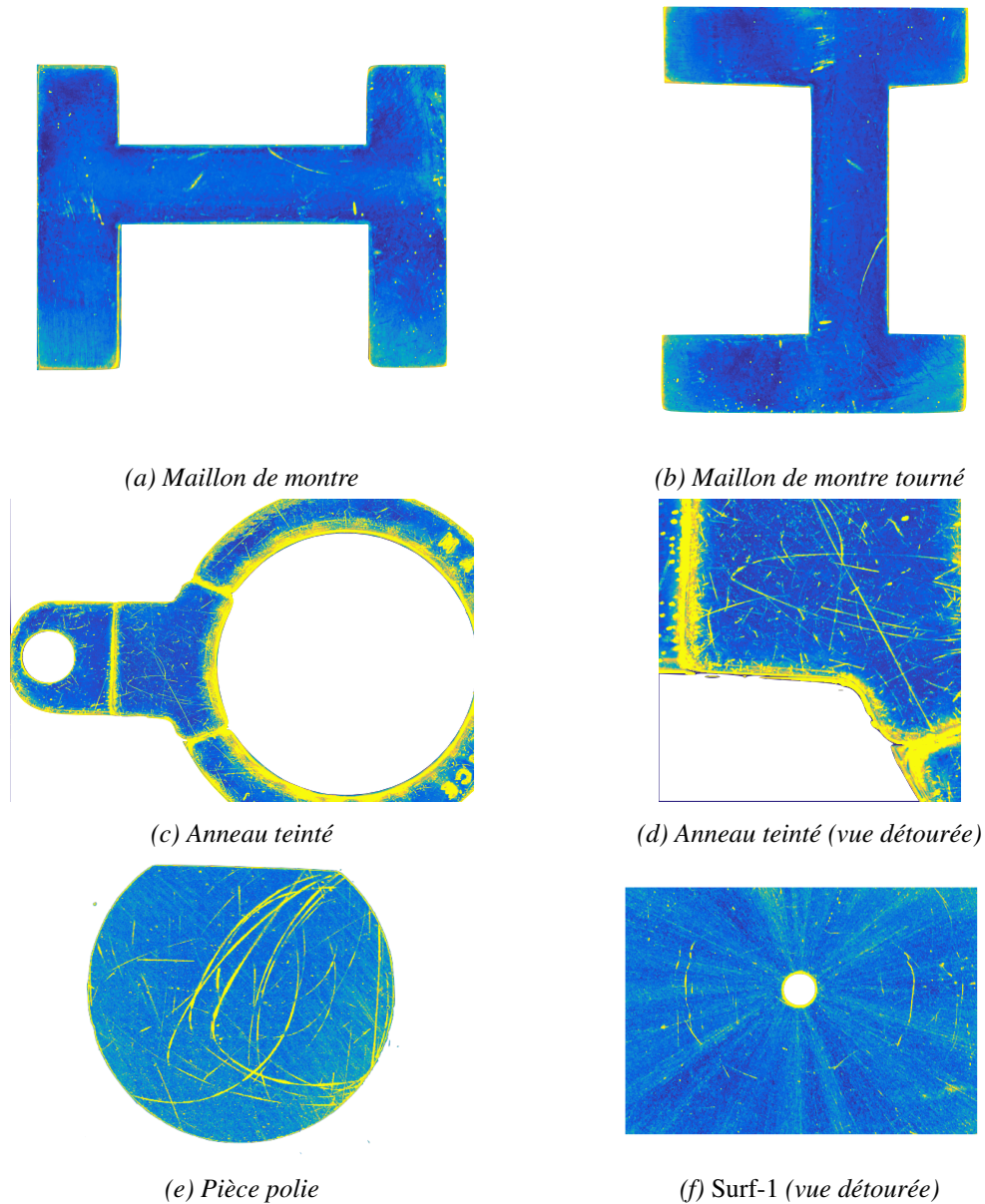


FIGURE 4.15 – Détection des anomalies d'aspect sur des surfaces réelles

utilisés peuvent être de nature très différentes (plastique, métal, bois, verre, etc.).

Une limite à la méthode est la sensibilité de la mesure de la similarité aux changements brutaux de la géométrie correspondant aux composantes basse-fréquence (la forme) de l'objet. Typiquement, les bords sur l'application de l'anneau teinté (figure 4.15c) sont identifiés comme des variations locales de l'aspect. Dans un processus d'estimation robuste de la similarité, il conviendra de filtrer les bords qui sont détectés comme des éléments saillants de la surface. Plusieurs approches sont envisagées pour conduire à une amélioration significative des résultats sur les *surfaces de forme libre* (*freeform surfaces* [Jiang 07]) :

- ☞ Enregistrer les caractéristiques de forme d'un objet de référence pour les filtrer ensuite par une méthode de reconnaissance en traitement d'images dans les résultats des échantillons du même lot.
- ☞ Redresser le nuage de luminances mesurées dans la direction des normales à la surface avant d'appliquer la DMD.
- ☞ Segmenter les régions de l'objet par les pentes, puis appliquer la chaîne de mesure de la similarité

séparément sur chaque région segmentée.

Toutefois, la méthode montre une certaine robustesse vis-à-vis des surfaces courbes et des géométries « simples », à l'instar de la surface supérieure du maillon (figures 4.15a et 4.15b) associée à une surface convexe (ne présentant pas d'arêtes franches). Les cartes de distance pour les deux configurations spatiales du maillon montrent par ailleurs la capacité de la méthode à supporter des changements de pose de la pièce sous le dispositif d'acquisition. Les résultats obtenus à partir de l'acquisition de la surface « polaire » (figure 4.15f) permettent également de mettre en évidence des anomalies présentes à la surface de l'échantillon bien que celle-ci présente des variations d'aspect importantes dues à l'orientation radiale du motif microgéométrique.

## 4.5 Evaluation des anomalies d'aspect

Un contrôle qualité efficace suppose que des actions soient mises en œuvre lors des trois étapes de l'inspection : l'exploration, l'évaluation et la décision. Le dispositif MeSurA permet de réduire la variabilité des résultats liée à la phase d'exploration. La représentation modale invariante à la rotation permet d'assurer quant à elle une séparation efficace des anomalies du reste de la surface. Après avoir déterminé le comportement moyen de réflexion lumineuse de la surface et identifier les régions les plus éloignées de ce comportement, il s'agit maintenant d'aider les contrôleurs à évaluer et à décider si les anomalies identifiées sont acceptables ou non. Or les mécanismes cognitifs entrant en compte dans la phase d'évaluation sont complexes. Il est peu probable qu'en quelques secondes, un observateur soit capable d'évaluer la BRDF dans son intégralité. Il est plus raisonnable de poser l'hypothèse que ce dernier extrait de la BRDF, des indices pertinents qui ouvrent sur le diagnostic de la qualité des surfaces. Nous allons examiner les variations de la luminance à l'endroit des anomalies d'aspect afin de proposer des facteurs objectifs sur lesquels les contrôleurs pourront se baser pour évaluer la criticité d'une anomalie d'aspect. Il s'agit de trouver une relation entre des caractéristiques de l'anomalie (stimuli physiques) et la sensation de façon ensuite à réduire la part de subjectivité lors de l'estimation de ces facteurs influents. L'analyse des différentes modalités obtenues (reconstruction RTI, paramétrage des invariants, cartographie de distance, cartographie de courbure) de la représentation virtuelle doit nous aider à déterminer des attributs fiables sur lesquels nous pouvons associés des niveaux d'intensité qui soient en accord avec l'impact visuel de ces anomalies.

### 4.5.1 Pré-traitements

Pour évaluer et comparer les anomalies, il est nécessaire de segmenter et de labelliser les résultats de la carte de distance dans le but de traiter séparément les zones critiques. La sélection des zones critiques de la surface dans les cartes de distance obtenues est une opération simple car les zones saillantes sont très contrastées par rapport au reste de l'image. La valeur du seuillage de la segmentation est fixée de manière automatique à partir des caractéristiques de l'histogramme de la cartographie de distance. Un algorithme de labellisation de région est ensuite appliqué sur l'image binaire résultante. Cette étape segmentation/labellisation ne fait pas l'objet dans ces travaux d'une étude bibliographique approfondie. Nous utilisons les fonctions existantes de Matlab. La figure 4.16 donne les résultats obtenus lors des phases de segmentation (P1) et de labellisation (P2) à partir de la cartographie de distance de l'échantillon E2, présentées ci-dessous.

**P1 Segmentation :** nous appliquons la méthode de Otsu [Otsu 75] (fonction *multithresh*) qui est une méthode non-paramétrique et non-supervisée de sélection automatique de seuil pour la segmentation d'une

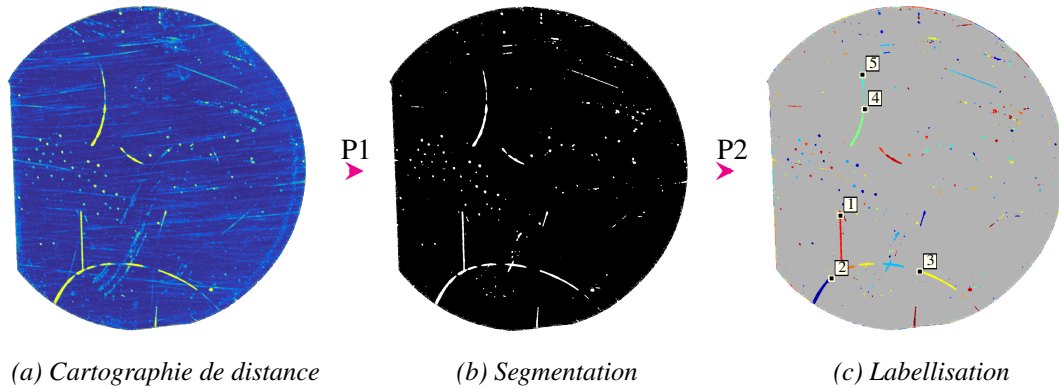


FIGURE 4.16 – Procédures de segmentation et de labellisation de l'échantillon E2

image. Un seuil optimal est sélectionné à l'aide d'un critère discriminant qui maximise la séparabilité des classes résultantes en terme de niveaux de gris. La procédure est très simple, elle utilise seulement le moment d'ordre 0 et d'ordre 1 de l'histogramme cumulé de niveau de gris.

**P2 Labellisation** : le principe d'un algorithme de labellisation est de détecter les régions blanches (en l'occurrence ici les régions saillantes) de l'image en leur attribuant à chacune un label (un numéro d'identification) différent. Pour une image binaire, on produit une image dite de labels qui comportera, pour chaque pixel de l'image binaire, le label qu'il lui est associé. Les principaux paramètres qui influent sur le résultat de labellisation sont liés à la procédure de balayage des différentes passes de l'image et au degré de connexité spécifié (4 ou 8 voisins). L'implémentation (fonction *bwlabel*) s'appuie sur la procédure générale présentée dans [Haralick 93].

#### 4.5.2 Groupes d'attributs

Pour une anomalie identifiée, les limites d'acceptation sont difficiles à établir, une même anomalie ayant un impact très différent selon, par exemple, son positionnement sur le produit ou son orientation (cas d'une rayure dans la direction de la texture). La présence combinée de plusieurs anomalies sur la surface a également une incidence sur leur impact respectif dans la perception que l'on a du produit. Avant de lister les attributs qui peuvent être exploités pour établir le profil sensoriel d'une anomalie à l'origine d'un écart, nous identifions deux groupes d'attributs :

- **la description factuelle** de l'anomalie se réfère aux caractéristiques intrinsèques de l'anomalie. Les descripteurs les plus fréquemment utilisés sont de type *géométrique* : critères de taille (largeur, longueur, surface du rectangle circonscrit de l'anomalie, périmètre, etc.), des critères spécifiques (nombre de trous, critère d'Euler, nombre d'angles obtus/aigus), ou encore des moments (calculés sur l'image binaire ou sur les images à niveau de gris), etc.
- **la mise en perspective** de l'anomalie se réfère à l'interaction entre l'environnement de l'anomalie et l'anomalie elle-même. Ces informations de contexte ne sont souvent pas pris en compte pour faciliter la reconnaissance automatique des défauts.

Ces cartographies de saillance obtenues par l'approche modale ouvrent la possibilité d'acquérir de nombreuses connaissances à partir des nombreuses informations disponibles : l'origine des défauts rencontrés, leur fréquence d'apparition ou encore leur représentativité. Nous allons voir comment exploiter les diverses informations issues de notre modélisation dans le but d'évaluer la criticité des anomalies détectées pour qu'un standard puisse être écrit en étant parfaitement représentatif de la qualité souhaitée par l'entreprise. Il est indispensable que les experts évaluent de la même manière les attributs d'aspect recherchés sur la surface,

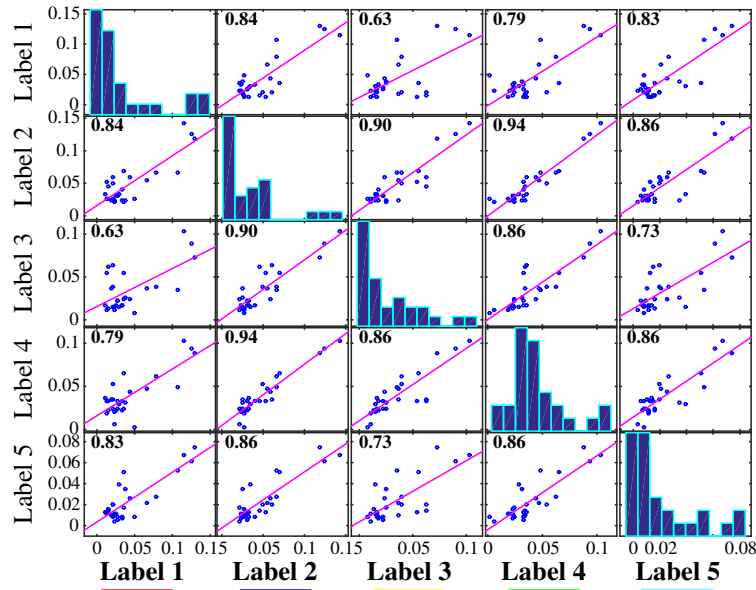


FIGURE 4.17 – Matrice de corrélation des spectres modaux  $\lambda'_j$  des rayures labellisées de l'échantillon E2

cela implique d'avoir des connaissances générales mais aussi des connaissances physiques et techniques sur les anomalies concernées.

### 4.5.3 Typologie d'anomalie

Il peut par exemple être intéressant de déterminer, parmi un ensemble d'anomalies détectées sur la surface, les différents groupes de défauts (typologie d'anomalies) reflétant différentes causes possibles sur la chaîne de production. Pour cela, nous avons choisi de sélectionner les étiquettes sur le résultat de la labellisation de l'échantillon E2 (figure 4.16c) qui correspondent à des anomalies de type rayure. Les discontinuités au sein d'une même rayure causent une séparation lors de la labellisation (exemple des cas suivants : 2 avec 3, et 4 avec 5), et inversement, deux rayures entrecroisées seront étiquetées avec le même label. Nous comparons leur signature modale respective afin de définir s'il existe des modèles pour cette catégorie d'anomalies (rayures) permettant d'écrire des spécifications en terme de réflectance claires et les vérifier. Pour cela, nous comparons les spectres modaux moyens de ces rayures :

#### – mesures des corrélations linéaires entre les rayures labellisées de l'échantillon E2.

La figure 4.17 correspond à la matrice de corrélations des spectres modaux  $\lambda'_j$  associées aux rayures labellisées de l'échantillon E2. La rayure à la topographie maîtrisée possède le label 1, nous constatons que les coefficients de corrélation affichés sont les plus faibles pour les corrélations entre la rayure calibrée et le reste des rayures qui sont apparues suite aux nombreuses manipulations de la pièce. Autrement dit, les rayures apparues ultérieurement sur la surface sont plus proches en terme de réflectance les unes des autres, qu'avec la rayure engendrée par un indenteur de type Berkovitch.

#### – mesures des corrélations linéaires entre les rayures calibrées des échantillons E1, E2 et E3.

Nous proposons maintenant de déterminer s'il existe un comportement moyen des rayures calibrées en calculant la matrice de corrélations (figure 4.18d) entre les différentes paires possibles à partir des 3 échantillons. Les résultats de la corrélation linéaire des spectres modaux montrent qu'il est difficile de regrouper les rayures calibrées des échantillons E1, E2 et E3 dans une même famille de défauts uniquement à partir de leur spectre modal.



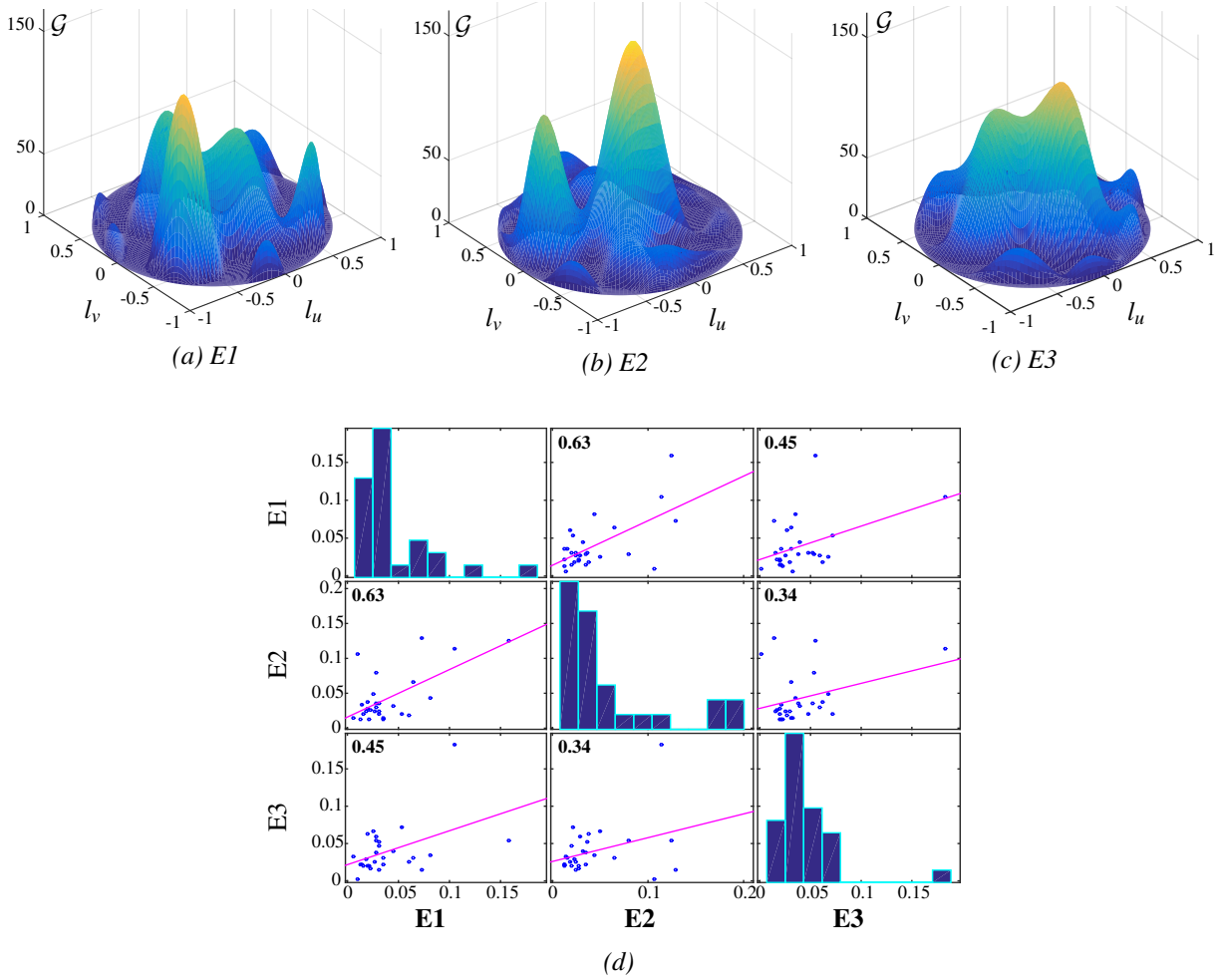


FIGURE 4.18 – Surfaces de luminance (a), (b) et (c) des rayures calibrées, et (d) la matrice de corrélation des spectres modaux associés  $\lambda'_j$

Les spectres modaux ne semblent donc pas suffire pour classifier les anomalies d'aspect en terme de typologie. A ce stade, nous n'avons pas tenté de classer les défauts par typologie.

#### 4.5.4 Niveaux de luminance et contraste de luminance

L'évaluation des anomalies ne peut pas être résolue en analysant uniquement les niveaux de luminance appartenant aux pixels de l'anomalie. Afin de conserver une cohérence spatiale dans l'espace  $(u, v)$  de l'image, nous souhaitons donner une évaluation fine du changement de contraste entre l'anomalie et son voisinage. Une approche possible est d'analyser une zone locale englobant les pixels incriminés et leur voisinage à des résolutions différentes à l'instar des algorithmes de saillance. Cependant, cette technique est coûteuse en temps de calcul et en quantité des données à traiter, en raison de la taille de la matrice virtuelle à construire en interpolant les mesures d'origine à des niveaux d'échelle différents. Une approche plus directe consiste à soustraire la surface de luminance associée au voisinage direct de l'anomalie, de celle de l'anomalie elle-même. Le principe de l'opération est résumé sur la figure 4.19. L'opération est simple et rapide car elle consiste en pratique à soustraire le spectre modal moyen associé à la rayure, du spectre modal moyen associé au voisinage de la rayure, puis de reconstruire une surface de luminance à partir du spectre modal résultant de la soustraction. La surface de luminance obtenue représente le contraste de luminance entre la caractéristique à détecter et son voisinage. Plus le contraste est fort, plus le motif de l'anomalie est



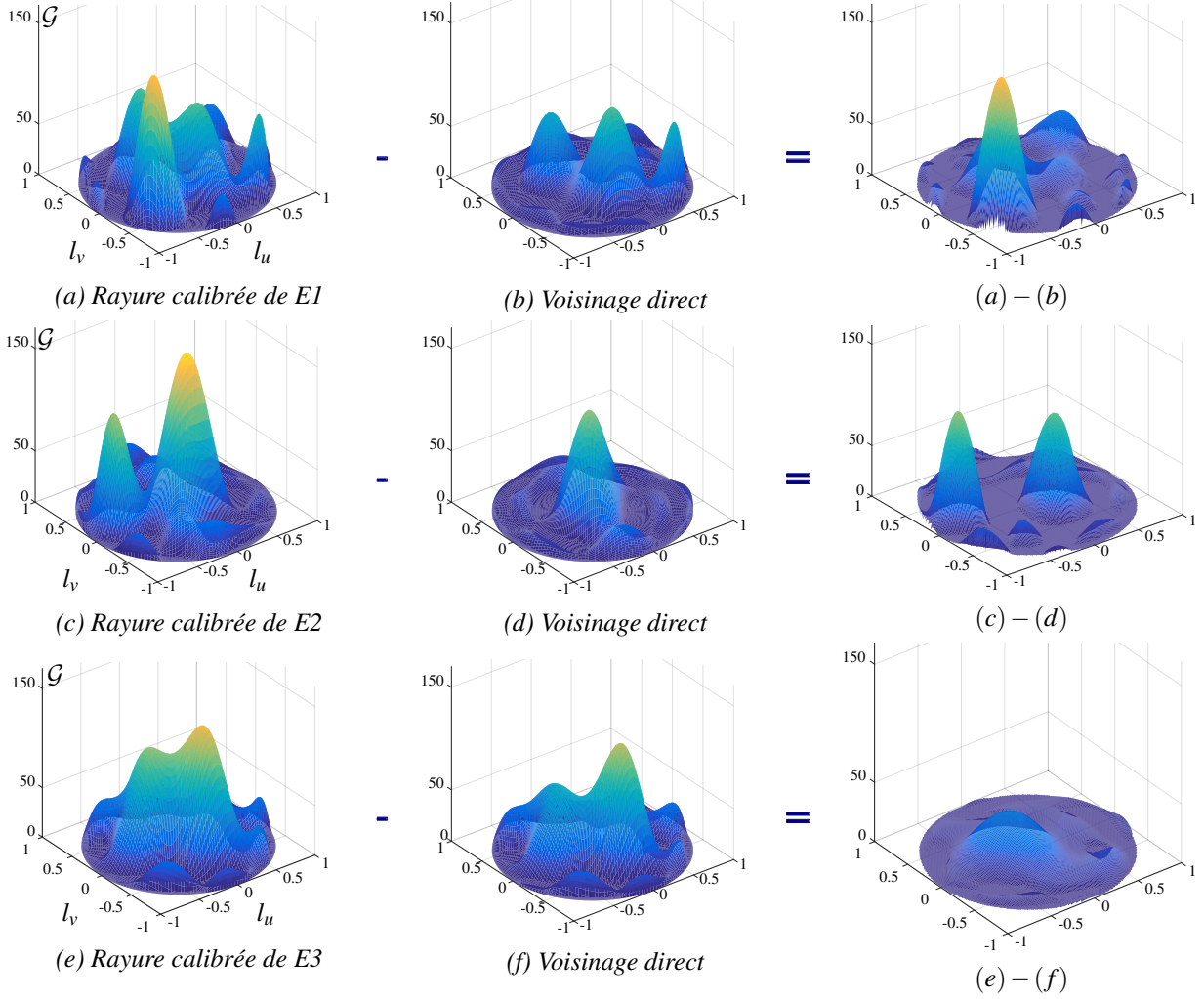


FIGURE 4.19 – Surfaces modélisant le contraste de luminance, obtenues en calculant la différence entre la caractéristique détectée et son voisinage direct

visible. Plus les zones de fort contraste seront nombreuses ou grandes, plus la différence entre l'anomalie et son voisinage sera apparente sous de nombreuses configurations d'éclairage.

#### 4.5.5 Saillance d'une anomalie

Pour déterminer l'effort de détection, nous proposons de synthétiser le résultat obtenu précédemment par une valeur scalaire en calculant le volume sous la surface de contraste de luminance. Le but de la mesure est de fournir un indicateur fiable qui quantifie l'effort de détection d'une anomalie d'aspect, et de proposer une échelle de criticité pour aider les contrôleurs à évaluer les anomalies les unes entre elles en terme de visibilité. Ainsi on calcule par un algorithme numérique les volumes sous les surfaces obtenues précédemment qui caractérisent le contraste de luminance entre l'anomalie et son voisinage. Le calcul numérique des volumes donnent les valeurs suivantes en unité de volume :

$$V_{E1} = 40.9 \quad V_{E2} = 29.1 \quad V_{E3} = 22.0 \quad (4.6)$$

Cette valeur fournit une estimation de la saillance visuelle de l'anomalie considérée car elle prend en considération l'ensemble des directions d'illumination qui permettent de la mettre en exergue. Si l'on affiche la visibilité (valeur donnée en pourcent dans le tableau 4.2) des rayures en fonction de cette valeur, les valeurs

s'organisent dans le même ordre. Une perspective à ce travail est de pouvoir modéliser la réponse du système visuel humain en fonction du volume de contraste de luminance calculé sur les caractéristiques détectées afin d'être le plus proche de la perception visuelle humaine. Pour cela, on pourra mettre en compétition d'autres attributs classiquement utilisés pour paramétrer les anomalies d'aspect, comme la forme de l'enveloppe de l'anomalie, sa localisation, etc.

Enfin la décision à partir des critères et des niveaux d'intensité associés peut être réalisée selon des approches différentes. Différentes règles de décision peuvent être utilisées, les plus courants sont : un seuil sur un descripteur, des arbres de décision, la mise en oeuvre de réseaux de neurones, ou la mise en place d'un système basé sur la logique floue qui se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain.

#### 4.5.6 Cartographie de la visibilité d'une anomalie en fonction des directions d'éclairage

Les cartographies de distance segmentées et labellisées permettent de localiser les anomalies d'aspect dans le plan  $(u, v)$  de l'image. Ces résultats sont une synthèse de toutes les directions d'éclairage. En contrepartie, nous avons perdu l'information associée à la (les) direction(s) d'illumination qui révèlent la présence des anomalies identifiées. Nous avons vu que la surface de luminance d'une anomalie d'aspect est un indicateur intéressant pour évaluer le cône d'éclairage (secteur angulaire) sous lequel les anomalies sont visibles. Une vue de dessus de la surface de luminance permet d'apprécier les direction de fortes variations. Le contrôleur peut ainsi retrouver les incidences d'éclairage pour lesquelles la caractéristique considérée est visible. La figure 4.20 montre l'intérêt d'une telle visualisation sur l'échantillon d'application E2. La superposition de cette cartographie sur l'élément d'interface avec lequel l'utilisateur contrôle la direction d'éclairage permet à ce dernier de retrouver facilement et rapidement l'anomalie considérée. Cette cartographie minimise les connaissances a priori requises de la part de l'utilisateur sur la compréhension du modèle utilisé. Une extension future du logiciel *MsaTool*<sup>®</sup> est en cours pour permettre au contrôleur de basculer facilement entre la cartographie des anomalies identifiées et la représentation virtuelle RTI. Ainsi il pourra s'assurer que les zones identifiées relèvent réellement d'une anomalie, ce qui constitue une étape importante de la construction du système d'identification des anomalies d'aspect.

On peut aussi envisager d'automatiser le parcours d'éclairage, présenté dans la section 2.3.2, pour guider l'utilisateur dans son exploration. Cette opération suppose de pouvoir déterminer les coordonnées  $(l_u, l_v)$  qui correspondent à des maxima locaux de la surface de luminance. Cependant, une résolution mathématique ne semble pas suffire pour prédire les extréma (maximum ou minimum) de la surface de luminance reconstruite uniquement à partir des données de départ et de l'équation (combinaison linéaire). Dans certains cas, des méthodes et des algorithmes d'optimisation différentiable (algorithme du gradient, méthode de Newton, quasi-Newton, etc.) peuvent être mises en oeuvre [Aganj 10].

Finalement, la visualisation de la surface de luminance est pertinente pour mieux comprendre la réflexion lumineuse associée à des caractéristiques détectées. Il n'est cependant pas question de recenser et de créer une base de données en enregistrant les spectres modaux des différentes formes de surface de luminance rencontrées.

## 4.6 Conclusion

Les mécanismes de mesure de similarité sont basés sur la mesure de statistiques de l'image. Pour les anomalies d'aspect, l'idée est d'isoler les pixels ayant des caractéristiques suffisamment en rupture des autres

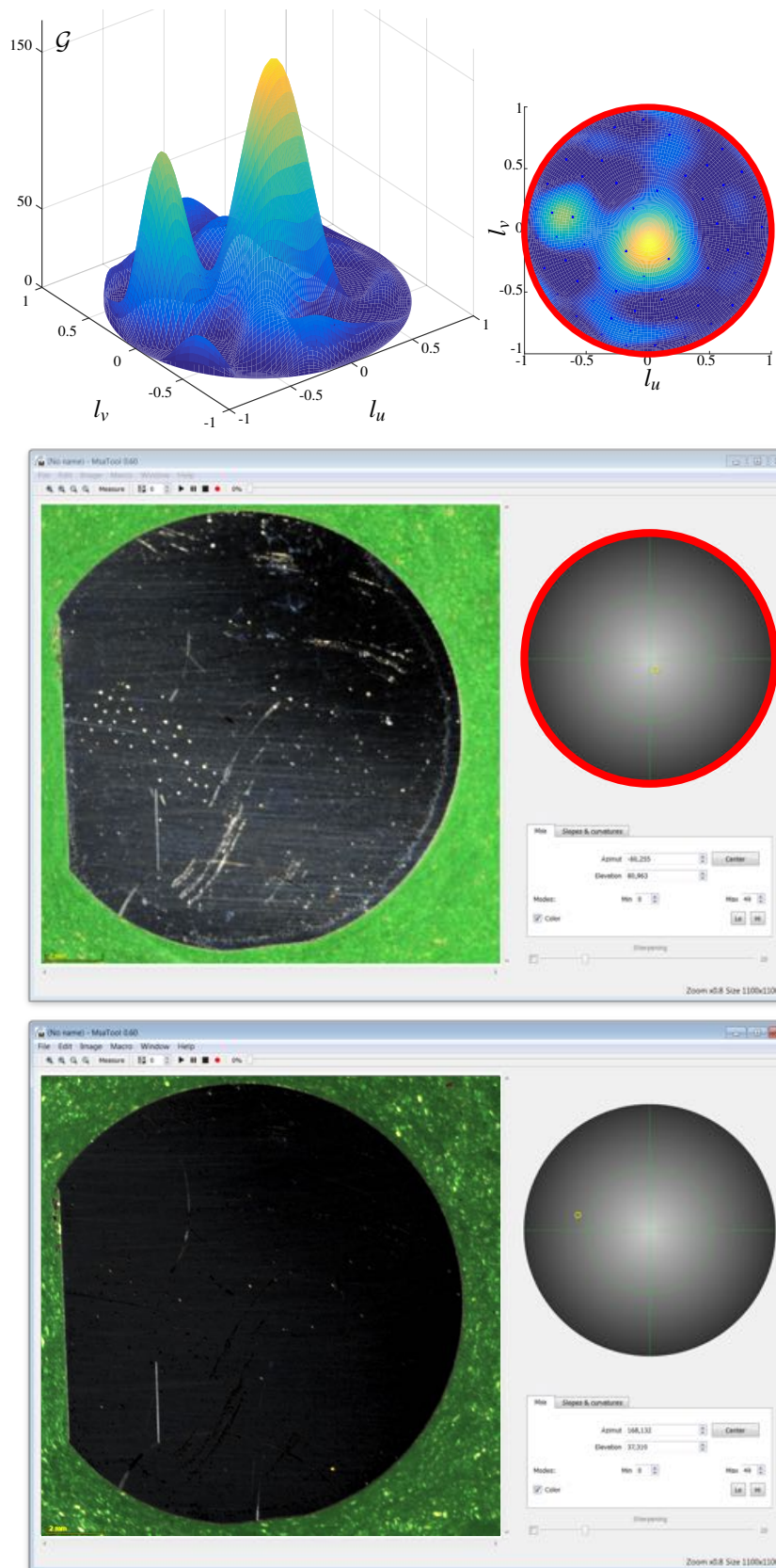


FIGURE 4.20 – Rayure E2

afin de les identifier de la manière la plus robuste et rapide possible. Du fait que ces opérations de reconnaissance ou d'identification de caractéristiques saillantes sont effectuées à partir d'une image conventionnelle de la surface (sous des conditions d'éclairage souvent mal maîtrisées), elles offrent rarement les résultats escomptés. On rappelle que la quantité principale de notre étude est la variation angulaire de la luminance en fonction de la direction d'illumination. Cette mesure nous permet d'accéder à des cartographies de la lumière réfléchie à la surface de l'échantillon. La modélisation continue de l'interaction lumière/surface est obtenue à partir des données d'acquisition RTI selon le principe de la Décomposition Modale Discrète. La DMD permet ainsi de réduire à un nombre fini de variables (amplitudes modales) l'information mesurée en chaque point de la surface de l'échantillon. Nous avons vu que les ressemblances de forme des surfaces de luminance reconstruites traduisent des similitudes d'aspect entre différentes zones d'une surface, que nous avons cherché à quantifier. Les apports de ce chapitre concernent :

- ☞ la définition d'un changement de paramétrage de la DMD qui transforme les amplitudes initiales  $\lambda_i$  en leurs invariants à la rotation  $\lambda'_j$ ,
- ☞ la mesure des similarités et des dissimilarités d'aspect à l'aide de la distance de Mahalanobis calculée à partir des amplitudes  $\lambda'_j$  obtenues,
- ☞ la détermination des attributs pour l'évaluation des anomalies d'aspect en faisant des hypothèses sur le niveau d'information que l'observateur exploite dans la répartition de luminance pour élaborer sa sensation.

Contrairement aux méthodes de visualisation classique, la modélisation proposée offre un cadre favorable à une mesure de la similarité d'aspect. En outre la capacité de la représentation modale obtenue suite au changement de paramétrage à être insensible à une variation de pose de l'objet sous le dispositif ou aux orientations variables d'un motif de la surface sont un avantage considérable en terme d'application pratique. La technique a été appliquée à des échantillons de texture réelle, et une sélection de résultats expérimentaux ont été présentés.

La méthodologie permet d'envisager une extension future du système à la reconnaissance d'aspect pour de nombreuses applications. L'application présentée dans la section 4.4.2 nous a permis d'évaluer l'efficacité de la méthode en se basant sur une validation croisée entre les résultats du contrôle sensoriel qui a permis de déterminer les capacités des contrôleurs humains à détecter des rayures à la topographie maîtrisée, et l'extraction de ces mêmes rayures en utilisant notre chaîne de traitement. De plus, nous avons montré la pertinence des cartographies obtenues, vis-à-vis de celles calculées par un algorithme de saillance qui a été élaboré pour mimer les performances du système visuel humain.

Une perspective de ce travail consistera à évaluer les performances de la technique dans un contexte industriel pour démontrer qu'elle améliore significativement les résultats lors des étapes de détection et d'évaluation des anomalies d'aspect, en terme de variabilité. Cela pourra être réalisé en mettant en oeuvre un test  $R^2 \& E^2$  [Baudet 12] pour rendre compte de la capacité du contrôleur d'une part et d'autre part du système (dispositif + méthodes) à identifier ce qui relève réellement d'une anomalie, sur un même lot de produits.

Nous avons défini une approche de la recherche de similarité (hors interaction utilisateur) des surfaces. La signature moyenne de la surface qui sert de référence au calcul de la distance de Mahalanobis peut être cependant supervisée par un opérateur humain. Autrement dit, il est possible d'améliorer les résultats en intégrant l'utilisateur dans un processus de recherche bouclant sur lui-même. Il s'agit pour ce dernier de définir la zone de la pièce ou l'objet qui servira de référence pour la mesure des écarts d'aspect.

Par ailleurs, une perspective est l'exploitation de l'information des phases des modes des surfaces de luminance reconstruites, dans le cadre de la maîtrise de l'aspect. Des travaux en ce sens donnent lieu à des investigations concernant la caractérisation perceptuelle de l'orientation d'une texture.

## Analyse en pentes et en courbures

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>95</b>
<b>5.2</b>	<b>Calcul et choix des indicateurs de pente et de courbure</b>	<b>96</b>
5.2.1	Des normales aux courbures	96
5.2.2	Indicateurs de courbures équivalentes	97
5.2.3	Pentes et courbures directionnelles	101
<b>5.3</b>	<b>Estimation des pentes et des courbures par stéréophotométrie</b>	<b>103</b>
5.3.1	Systèmes et méthodes d'acquisition	103
5.3.2	Echantillons d'application	104
5.3.3	Comparaison des approches	106
5.3.4	Autres applications	110
<b>5.4</b>	<b>Caractérisation des types de forme de la microstructure</b>	<b>111</b>
5.4.1	Association des normales et de la forme locale	112
5.4.2	Indice de forme (Shape Index) et intensité de courbure (Curvedness)	113
5.4.3	Approche multi-échelle : courbures et aspect des surfaces	114
<b>5.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>116</b>

---

## 5.1 Introduction

De nombreux procédés de fabrication donnent une finition caractéristique à la surface des produits. L'analyse de l'état de surface peut offrir des informations utiles en ce qui concerne le traitement et les variables en lien avec les réglages des machines outils [Le Goïc 16]. Or nous avons proposé dans le chapitre précédent une méthode afin d'identifier automatiquement les éléments sur la surface qui ont un aspect éloigné de l'aspect global en exploitant les informations issues de la DMD. Ces variations locales d'aspect sont principalement dues à la présence d'irrégularités microgéométriques à la surface des pièces. Cependant les moyens de mesure topographique ne permettent pas de quantifier ces éléments indésirables car ils sont souvent trop fins pour être mesurés.

La caractérisation géométrique reste pourtant une étape essentielle pour piloter les outils de création des surfaces et/ou organiser des actions de développement sur les moyens de fabrication ou de transport des produits. Pour un procédé de polissage par exemple, la modification de l'état de surface a lieu lorsque de nombreuses particules dures glissent et roulent entre deux surfaces, enlevant de la matière du fait du déplacement relatif d'une surface par rapport à l'autre. Pour un procédé de sablage, des particules fines (abrasif) sont projetées à grande vitesse sur la surface pour produire des petits cratères ou des stries sur la surface. Chacun de ces processus d'abrasion implique à la fois des déformations plastiques et des ruptures liées essentiellement à la présence du troisième corps et qui dépendent de beaucoup de variables telles que les forces appliquées, la présence de liquides, ..., pouvant modifier considérablement l'apparence et la performance de la surface résultante, mais également des surfaces des outils ou des particules faisant le travail. D'autres applications sont confrontées à un problème d'état de surface où les éléments intrinsèques du matériau (les nervures sur du bois, par exemple) prédominent sur l'état de surface obtenu par rapport aux irrégularités de surface liées aux procédés de création de celle-ci. On cherche dans ces cas le moyen de séparer l'action liée à l'outil du reste, afin de pouvoir apprécier les effets d'un type d'usinage ou d'un réglage de machine-outil, ou encore d'utiliser les caractéristiques intrinsèques du matériau pour parvenir à une identification individuelle des produits et assurer leur traçabilité tout au long de la chaîne de production [Charpentier 03, Fuentealba 06].

Pour y parvenir, nous proposons des outils pour faciliter la caractérisation géométrique de la texture d'une part et d'autre part des écarts observés. Les approches que nous proposons dans ce chapitre s'inscrivent dans le cadre d'une méthodologie globale qui permet de mieux comprendre les interactions multi-physiques qui entrent en jeu dans la perception visuelle des surfaces réelles. Pour qualifier et quantifier les propriétés géométriques de la surface, nous appliquons l'équation générale de la stéréophotométrie à partir des données issues de l'acquisition stéréophotométrique issue du dispositif MeSurA afin d'obtenir une estimation directe des pentes à la surface. Cette approche limite ainsi la sensibilité des résultats en pentes et en courbures obtenus, vis-à-vis du bruit présent dans la mesure et amplifié par les opérations de dérivation (figure 1.19). L'intérêt de l'approche « lumière inverse » est montré en comparant à même résolution les cartographies en pentes et en courbures obtenues à partir de la mesure conventionnelle de la topographie et à partir de l'approche stéréophotométrique.

Nous proposons également dans ce chapitre un état de l'art des principaux indicateurs de courbure, appelés *courbures équivalentes*, calculés à partir des *courbures principales* (les courbures minimale et maximale rencontrées en faisant tourner le plan de coupe autour d'un point de la surface). Leur étude nous permet de proposer des indicateurs géométriques spécifiques au cadre de l'analyse de la fonction d'aspect des surfaces. Un nouvel indicateur de courbures appelé *courbures directionnelles* est présenté. Il permet de séparer efficacement les composantes périodiques et non-périodiques de la surface. Cet indicateur n'est pas basé sur les intensités de courbures principales ( $k_1$  et  $k_2$ ). Il permet cependant de conserver l'information directionnelle essentielle à la mise en évidence de rupture de continuité de forme et/ou de réflectivité locales.



## 5.2 Calcul et choix des indicateurs de pente et de courbure

### 5.2.1 Des normales aux courbures

Nous avons vu dans la section 1.4.1 comment déduire la normale à la surface à partir des valeurs de luminance mesurées par le dispositif d'acquisition au pixel considéré. Ainsi, l'équation générale de la stéréophotométrie (cf. équation 1.24) permet à partir d'acquisition stéréophotométrique d'estimer le champ de normales de la surface. Ce résultat peut être représenté de plusieurs façons. Il est possible d'afficher soit séparément la valeur des composantes  $D_X$  et  $D_Y$ , soit d'utiliser une cartographie en couleur, communément appelée *normal map*, qui contient l'information d'orientation de la normale. Le paramétrage couleur des normales est obtenu en codant chaque direction de normale par une combinaison de couleur  $(R, G, B)$ . Si on éclaire une demisphère Lambertienne par trois sources lumineuses de couleur différente disposées autour, des gradients de couleur se forment : de droite à gauche pour le rouge, de haut en bas pour le vert, et de bas en haut pour le bleu. La mise en œuvre de cette colormap directionnelle est illustrée sur la figure 5.1. Ainsi, à chaque direction de normale est associé un codage couleur unique. La conversion permettant de passer des composantes du vecteur normalisé  $(N_x, N_y, N_z)$  de la normale à sa représentation couleur  $(R, G, B)$  dans la cartographie correspondante, est donnée par les relations suivantes :

$$R = \frac{N_x + 1}{2} \quad G = \frac{N_y + 1}{2} \quad B = N_z \quad (5.1)$$

La mise en œuvre de cette colormap directionnelle permet de fusionner l'ensemble de l'information directionnelle d'un champ de normales et ainsi d'évaluer la nature des variations géométriques sur la surface.

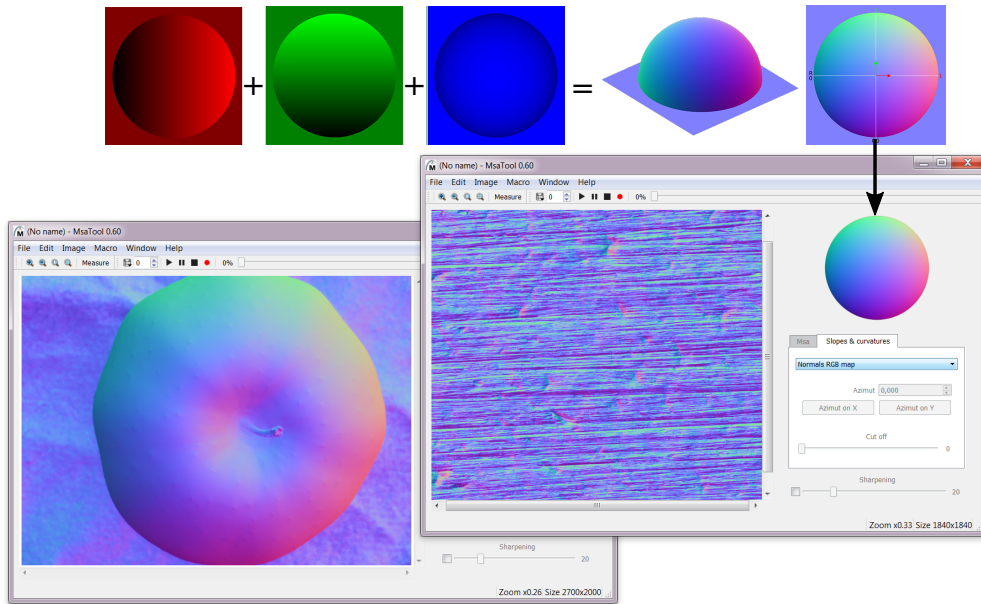


FIGURE 5.1 – Exemples de « Normal Map » observés sur le logiciel MsaTool®

L'estimation des courbures à partir des normales calculées repose sur l'adaptation des techniques d'analyse de fonctions continues et différentiables aux données discrètes. Typiquement, on calcule le gradient numérique en appliquant une matrice de taille  $3 \times 3$  à chaque cellule. Les pixels aux bords de l'image n'ont pas de voisinage en dehors de l'image. Il convient alors d'attribuer des valeurs aux pixels extérieurs en ajoutant une bordure de largeur 1 pixel que l'on remplit en considérant le bord de l'image initiale comme un miroir. La figure 5.2 illustre la convention adoptée pour l'indexation des cellules et les deux méthodes numériques retenues pour calculer le gradient qui varient en fonction du nombre de cellules considérées.

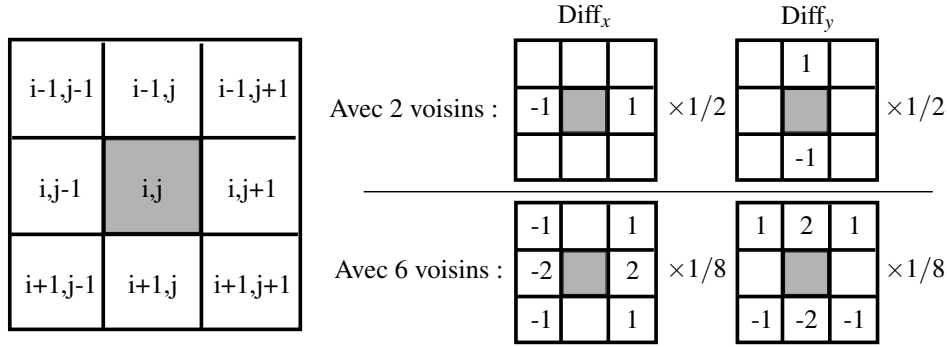


FIGURE 5.2 – Estimation numérique des différentielles (ou dérivées partielles) composant le gradient

L'approche la plus simple [Horn 81] utilise seulement 2 cellules pour le calcul de chaque dérivée partielle. Les différentielles qui composent le gradient sont donc estimées le long des deux axes principaux  $x$  et  $y$  selon le calcul suivant :

$$\begin{aligned} \text{Diff}_x &= \frac{p(i, j+1) - p(i, j-1)}{2\Delta x} \\ \text{Diff}_y &= \frac{p(i-1, j) - p(i+1, j)}{2\Delta x} \end{aligned} \quad (5.2)$$

où  $\Delta x$  représente la taille physique du pixel exprimée en  $\mu\text{m}$  et de largeur égale suivant les deux axes de l'image. En pratique, les matrices de taille  $3 \times 3$  données dans la figure 5.2 subissent une convolution avec l'image pour calculer respectivement les approximations des dérivées horizontales et verticales. Des analyses numériques [Hildebrand 87, Deboor 05] nous montrent que pour des surfaces rugueuses une meilleure estimation est obtenue en considérant 6 cellules au voisinage du pixel selon le calcul suivant :

$$\begin{aligned} \text{Diff}_x &= \frac{p(i-1, j+1) + 2p(i, j+1) + p(i+1, j+1) - (p(i-1, j-1) + 2p(i, j-1) + p(i+1, j-1))}{8\Delta x} \\ \text{Diff}_y &= \frac{p(i-1, j-1) + 2p(i-1, j) + p(i-1, j+1) - (p(i+1, j-1) + 2p(i+1, j) + p(i+1, j+1))}{8\Delta x} \end{aligned} \quad (5.3)$$

A partir des cartographies du champ de normales à la surface, on peut alors estimer les 3 termes du tenseur de courbures (equation 1.28) en chaque point de la surface.

### 5.2.2 Indicateurs de courbures équivalentes

Afin d'illustrer la notion de courbure sur des mesures d'états de surfaces mesurés (nuage de point discret), nous avons choisi une mesure (figure 5.3) de surface de contact d'une Prothèse Totale de Hanche en céramique (mesure PTH1) [Grandjean 12], auquel un post-traitement d'identification/exclusion des points aberrants a été appliqué [Le Goïc 13].

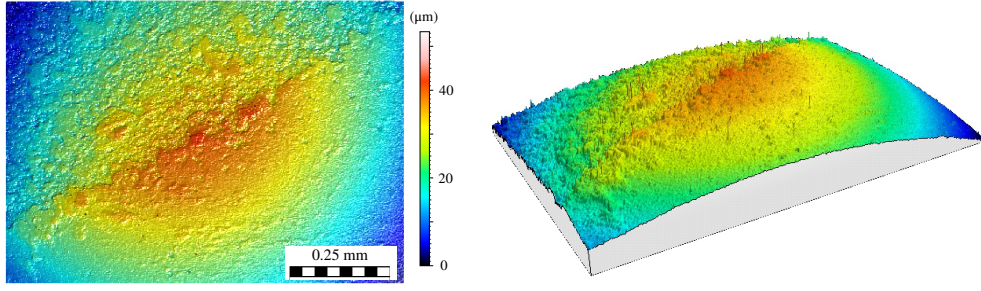


FIGURE 5.3 – Mesure d'une surface de contact de prothèse de hanche en céramique (PTH1), réalisée avec un microscope confocal chromatique Altisurf 520

Le calcul des courbures est spécialement pertinent pour analyser cet état de surface dans le cadre de l'étude du squeaking (phénomène vibratoire entraînant un grincement lors de la marche). L'altération en terme de rugosité de certaines zones des surfaces en contact génère localement de fortes intensités de courbures corrélées avec l'altération de la fonction attendue (liaison mécanique de type rotule) de l'assemblage.

Comme indiqué dans la section 1.4.3, il est souvent nécessaire de compacter l'information contenue dans le tenseur de courbures (equation 1.28) en un seul indicateur de courbures équivalentes, à la manière de ce qui est pratiqué dans le domaine de la mécanique des matériaux avec le tenseur de contraintes et les contraintes équivalentes de Tresca et Von Mises. L'indicateur de courbure équivalente doit nécessairement être invariant, i.e. construit à partir des deux invariants du tenseur de courbure  $I_1$  et  $I_2$ .

$$\begin{cases} I_1 = \text{tr}(K) = K_{xx} + K_{yy} \\ I_2 = K_{xx} \times K_{yy} \end{cases} \quad (5.4)$$

La définition des indicateurs de courbures équivalentes permet de mieux appréhender certaines caractéristiques de la géométrie locale de la surface, et ainsi de faciliter l'analyse et le lien avec la fonction attendue de la surface que l'on cherche à caractériser. Les principaux indicateurs de courbures équivalentes sont les suivants :

(a) **Courbures principales.**

Les courbures calculées selon les axes de mesure  $x$  et  $y$  sont deux directions particulières de calcul des courbures. Dans le cas général ces valeurs ne sont pas pertinentes, mis à part dans le cas de textures orientées de surface coïncidentes aux axes de mesure. Cependant, il existe en chaque point d'une surface deux directions particulières, orthogonales, pour lesquelles les courbures sont maximales et minimales. On parle alors de *courbures principales*, et les directions associées sont appelées *directions principales de courbure*. Mathématiquement, les courbures principales ( $k_i$ ) sont les valeurs propres  $\lambda$  du tenseur de courbure.

$$\det(K - \lambda I) = 0 \quad (5.5)$$

Le tenseur de courbure s'écrit alors dans le repère principal sous la forme donnée par l'équation 5.6a, et les directions principales ( $\vec{X}_1, \vec{X}_2$ ) peuvent alors être déterminées en résolvant le système défini par 5.6b.

$$K_p = \begin{Bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{Bmatrix}_{\vec{X}_1, \vec{X}_2} \quad (5.6a)$$

$$KX_i = \lambda X_i \quad \text{avec } \lambda = \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \quad (5.6b)$$

(b) *Courbure maximales, minimales et Directions principales de courbures*

La représentation des courbures maximales (et/ou minimales) et de leur orientations peut être pertinente pour détecter les anomalies de forme locales sur les surfaces [Roberts 01]. Les courbures et orientations maximales sont obtenues à partir des courbures principales (equation 5.7). Une représentation des courbures principales à différentes échelles estimées sur la surface d'application choisie (figure 5.3) est présentée dans la figure 5.4.

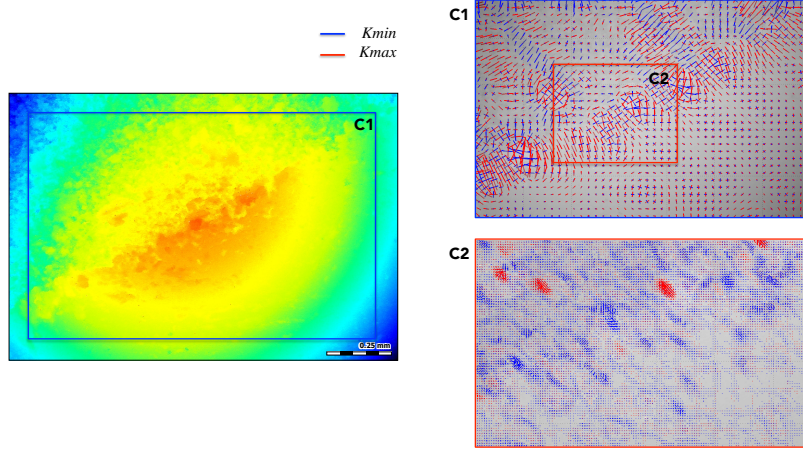


FIGURE 5.4 – Cartographie en courbures principales à différentes échelles, à partir de la surface PTH1

Cette représentation concentre l'ensemble des informations en courbure de la surface, elle est donc souvent difficile à interpréter. De plus, on peut noter l'importance du choix de l'échelle lors de l'estimation des courbures. De plus, on vérifie la propriété d'orthogonalité des courbures principales.

$$\begin{cases} k_{max} = \max(k_1, k_2) \\ \cos(\theta_{max}) = \frac{\vec{v}_{max} \cdot \vec{x}}{\|\vec{v}_{max}\|} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\text{avec } \begin{cases} \vec{v}_{max} = v_1 & \text{si } k_{max} = k_1 \\ \vec{v}_{max} = v_2 & \text{si } k_{max} = k_2 \end{cases}$$

(c) *Courbure de Gauss.*

Gauss [Gauss 27] dans ses travaux fondamentaux sur la théorie des surfaces au 19<sup>ème</sup> siècle a montré que la courbure est, à la différence d'une information en altitudes ou en pentes, un invariant local intrinsèque à la surface, *i.e.* indépendant de la base ou de l'espace choisi et défini par la surface en elle-même. La courbure de Gauss, aussi appelée *courbure totale*, est définie comme étant le produit des courbures principales (equation 5.8). Mathématiquement, la courbure de Gauss est le second invariant du tenseur de courbure (figure 5.5a).

$$K_g = k_1 \times k_2 = I_2 \quad (5.8)$$

Si la courbure de Gauss est constante et à valeur nulle sur une surface, alors la surface est dite *développable*. Cette propriété correspond par exemple au cas d'une surface plane, ou de la surface latérale d'un cylindre (intérieure ou extérieure). Ainsi, la courbure de Gauss permet de définir des familles de surfaces mais ne permet pas forcément de différencier certaines formes entre elles.



(d) **Courbure Moyenne.**

La courbure moyenne en elle même est rarement pertinente pour caractériser les courbures. Cependant, la combinaison avec la courbure de Gauss permet une caractérisation par type de la forme locale d'une surface. Mathématiquement, la *courbure moyenne* est définie comme étant la moyenne des courbures principales ou des termes diagonaux (premier invariant) du tenseur de courbures.

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{tr(K)}{2} = \frac{I_1}{2} \quad (5.9)$$

(e) **Courbure Totale** L'indicateur de courbure totale est proche de l'indicateur de courbure moyenne, bien qu'il soit basé sur la valeur absolue des courbures en chaque point (equation 5.10). Il permet une estimation globale de l'état de courbure local en terme d'intensité (figure 5.5b).

$$K_{tot} = abs(k_1) + abs(k_2) \quad (5.10)$$

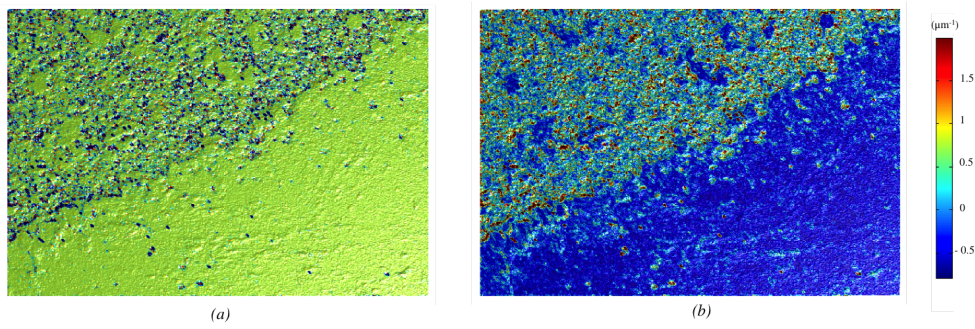


FIGURE 5.5 – Estimation des courbures de Gauss (a) et courbures totales (b) à partir de la surface PTH1

(f) **Courbure de Mehlum.**

Mehlum et Tarrou [Mehlum 98] ont proposé de nouveaux indicateurs de courbure afin de mieux décrire localement les surfaces. Il sont dit d'ordre 2, l'ordre 1 étant l'ordre des indicateurs de courbures présentés précédemment. L'indicateur de Mehlum d'ordre 2 (figure 5.6) permet de mettre en évidence les variations locales de courbure, et fournit ainsi une description plus avancée de la forme locale des surfaces. L'expression de cet indicateur est donné par :

$$K_{mehlum2} = \frac{3}{2}H^2 - \frac{1}{2}K_g = \frac{3}{8}I_1^2 - \frac{1}{2}I_2 \quad (5.11)$$

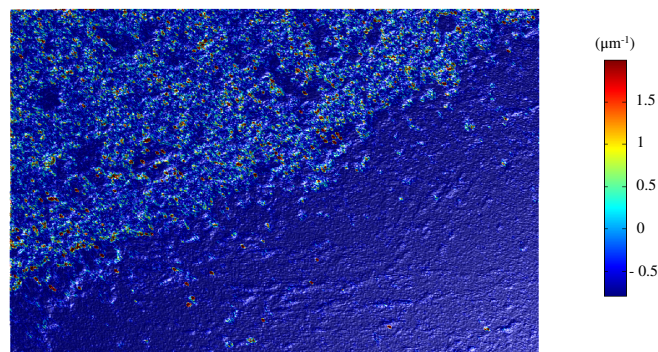


FIGURE 5.6 – Estimation et représentation en courbures de Mehlum à partir de la surface PTH1

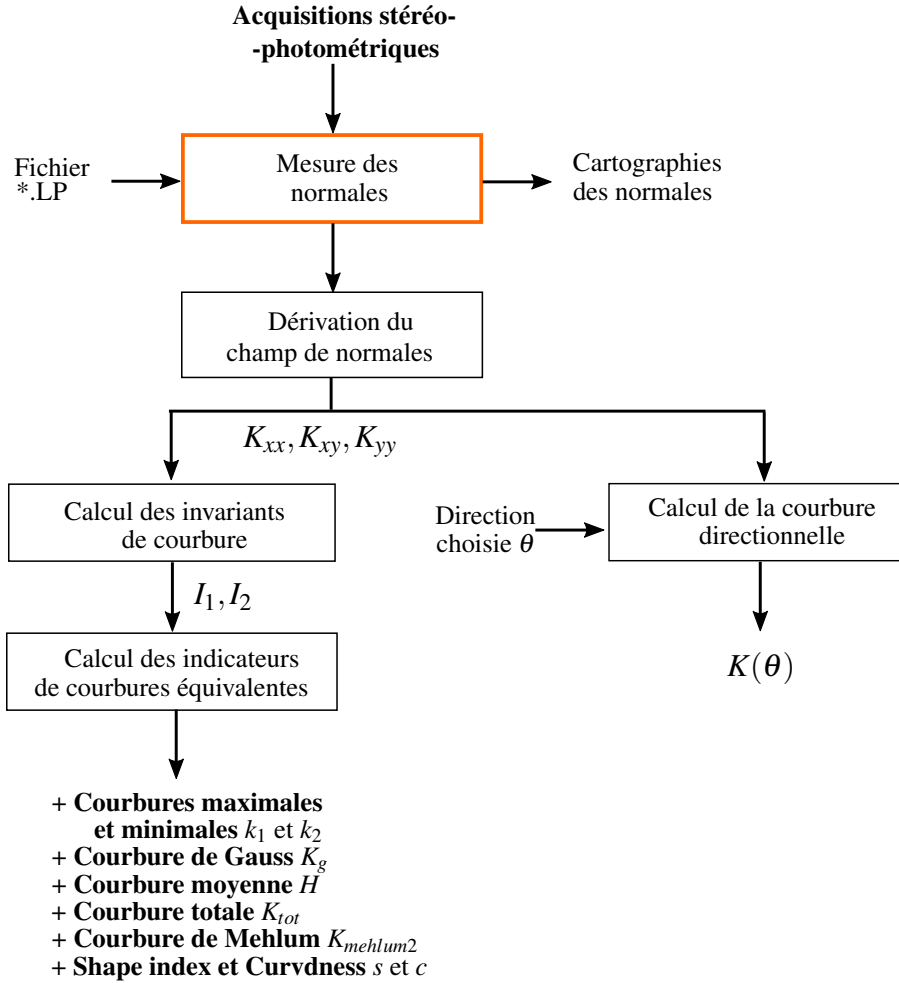


FIGURE 5.7 – Chaîne de traitement en courbures

En synthèse, les indicateurs de courbure équivalente permettent de compacter l'information contenue dans le tenseur de courbures dans un espace de dimension qui permet leur représentation 2D/3D. Ils facilitent ainsi l'analyse des variations de forme locales et de la micro-géométrie de la surface. Des travaux de recherche et des réalisations industrielles s'appuient sur ces différents attributs de courbure, afin de caractériser fonctionnellement les surfaces, notamment dans le cadre de l'analyse du lien entre les attributs géométriques des états de surfaces et leur perception visuelle [Le Goïc 12, Rose 09, Andersson 09]. La figure 5.7 résume la procédure de calcul des différents indicateurs de courbure. La branche de gauche de la chaîne de traitement correspond aux indicateurs de courbures équivalentes présentés précédemment. La branche de droite du diagramme correspond à l'obtention d'un nouvel indicateur de courbure, appelé **courbure directionnelle** qui est présenté dans la section suivante. Cet indicateur n'est pas basé sur l'intensité de courbures principales ( $k_1$  et  $k_2$ ) cependant il permet de conserver l'information de direction essentielle pour mettre en évidence des ruptures dans la continuité de forme et de réflectivité de la surface.

### 5.2.3 Pentés et courbures directionnelles

De nombreuses surfaces réelles présentent un motif géométrique directionnel. Si les directions associées ne coïncident pas avec les axes de l'image, la représentation des composantes des normales et des courbures suivant les axes de l'image ne fournit pas un cadre propice à l'interprétation des résultats. Dans ces cas, nous proposons d'estimer les pentes et les courbures dans les directions principales de la texture.



(i) **Pentes directionnelles**

La projection de la pente demande une opération angulaire. Mathématiquement, la rotation d'angle  $\theta$  du vecteur unitaire de pentes peut être calculé à l'aide de la matrice de rotation :

$$\begin{pmatrix} D_x(\theta) \\ D_y(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

La direction pour la représentation des pentes est laissée au choix de l'utilisateur qui pourra en fonction des orientations du motif sélectionner la ou les orientations privilégiées pour juger de la conformité du produit. En pratique, la direction  $\theta$  est représentée par un segment jaune sur le dôme de l'interface (section 5.3.4). L'utilisateur peut ainsi visualiser les pentes directionnelles de manière instantanée et observer les effets visuels de la géométrie qui sont fortement dépendantes des conditions d'observation. En se plaçant dans une direction parallèle à la direction du motif, il pourra filtrer celui-ci et voir ce qui se trouve « sous » la composante régulière de la surface. Inversement il pourra évaluer les effets de plus en plus visibles du motif géométrique en faisant progressivement varier l'angle  $\theta$  jusqu'à ce que l'élément de contrôle (segment) soit orthogonal aux directions principales du motif.

Il est par ailleurs possible d'obtenir des cartographies en pentes auto-adaptatives par rapport à la texturation de la surface analysée, où la direction de calcul des pentes en chaque point de la surface est déterminée pour coïncider avec les directions locales principales de texture. Ainsi, une séparation des composantes isotropes et non isotropes peut être réalisée de manière automatique sans connaissance a priori des directions de texturation de la surface inspectée. L'idée consiste à calculer les pentes suivant les axes associés aux directions de courbures principales  $\theta_{min}$  et  $\theta_{max}$  (cf. equation 5.7) qui indiquent dans quelles directions les courbures minimales et maximales sont atteintes.

(i) **Courbures directionnelles**

A l'instar des pentes directionnelles, nous pouvons calculer la courbure dans une direction particulière pour obtenir une représentation plus fidèle de la surface en lien avec la fonction d'apparence que nous cherchons à décrire. La courbure des surfaces exige théoriquement une infinité de déterminations : il faut connaître théoriquement la courbure selon l'ensemble des directions accessibles pour se former une idée complète de la courbure de la surface perçue. Or on peut faire passer une infinité de sections par chaque point d'une surface qui soient perpendiculaires à la normale. Pour chacune de ces sections, il faut chercher la courbure, ou le rayon osculateur. La courbure directionnelle fournit ainsi une information sur la vitesse de variation des pentes dans une direction particulière et est définie par la relation suivante :

$$K_n(\theta) = K_{xx} \times \cos(\theta)^2 + K_{yy} \times \sin(\theta)^2 \quad (5.13)$$

La projection d'un tenseur demande deux opérations angulaires. La première projection permet d'obtenir les courbures du plan orienté mais exprimées dans le repère initial. La seconde projection (termes cosinus carrés et sinus carrés) permet d'obtenir les courbures du plan orienté dans le plan du repère orienté (ie. deux fois l'opération de rotation). De façon pratique, on multiplie le tenseur des courbures par le vecteur orientant le plan d'observation, on obtient un vecteur courbures dont on fait le produit scalaire avec le vecteur orientant le plan pour obtenir la courbure directionnelle par le plan, dans ce même plan.

L'évolution de la courbure directionnelle défini à un endroit donné d'une surface théorique de type hyperbole est donnée dans la figure 5.8. Le cercle osculateur de rayon  $R_n$  est défini dans le plan orienté

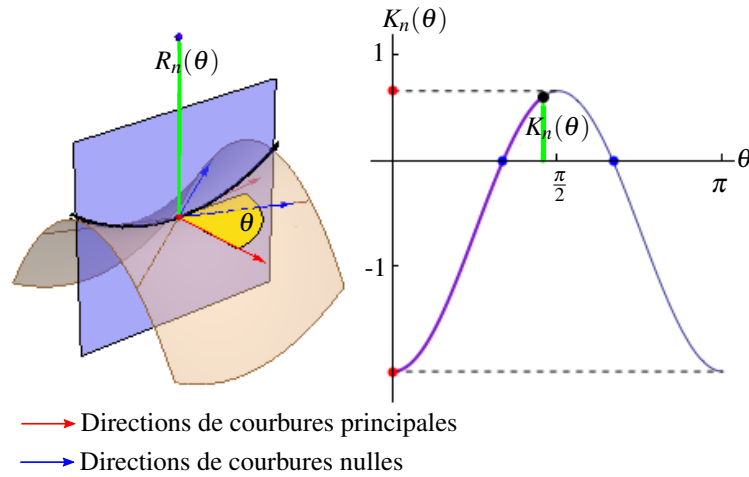


FIGURE 5.8 – Courbure directionnelle d'une surface théorique

d'angle  $\theta$  qui est perpendiculaire à la normale à la surface au point considéré. On peut suivre sur le graphe de droite l'évolution de la courbure directionnelle  $K_n$  pour  $\theta \in [0, \pi]$ . On rappelle que les courbures principales sont des directions orthogonales suivant lesquelles la courbure de la surface est maximale ou minimale. Les directions principales coïncident, dans ce schéma qui a valeur pédagogique, avec les directions du repère initial, ce qui est en pratique rarement le cas.

### 5.3 Estimation des pentes et des courbures par stéréophotométrie

#### 5.3.1 Systèmes et méthodes d'acquisition

Nous présentons dans cette section une application de l'analyse en pentes et en courbures à partir de données stéréophotométriques obtenues par une approche un peu différente de celle qui consiste à faire l'acquisition du lot d'images avec les dispositifs RTI de type dôme. L'approche originale consiste à déployer la technique RTI sur un système optique dédié à la mesure des états de surface selon la méthode de variation de focus. La mesure des états de surfaces par variation de focus, aussi appelée focalisation étendue [ISO-25178-6 10], est issue des développements initiaux de Nayar *et. al* sur le *Shape from focus* [Nayar 90, Nayar 92, Nayar 94]. Cette technique combine un système optique à faible profondeur de champ à une table de déplacement haute résolution en  $Z$ , et consiste à parcourir par couches verticales (images successives) la surface à mesurer. L'ensemble des informations acquises à chaque position verticale est fusionné pour estimer la hauteur du point considéré, puis par combinaison la topographie 3D de la surface (figure 5.9). De la même façon, une image virtuelle refocalisée associée à la texture de la surface en couleurs vraies [Niederöst 03, Danzl 09] est aussi générée. Un diagramme schématisé de ce principe de mesure est présenté dans la figure 5.9.

Le dispositif de mesure utilisé pour réaliser les mesures est un microscope à focalisation étendue *Alicona Infinite Focus G5* (figure 5.9) du laboratoire LE2I à Auxerre. Les paramètres de mesure pour les deux échantillons d'applications choisis (nombre de points, résolution verticale, résolution horizontale, paramètres d'illumination) sont décrits dans la section 5.3.2. Ainsi, la réalisation de plusieurs mesures d'un même état de surface en faisant varier les directions d'éclairage va nous permettre de combiner les approches. La

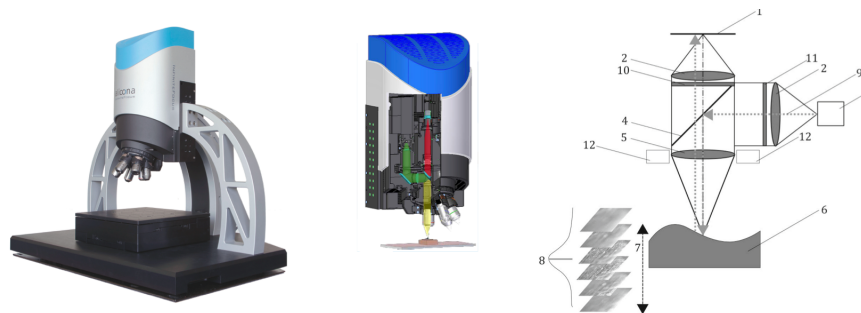


FIGURE 5.9 – Principe du microscope à focalisation étendue Aicona Infinite Focus G5

procédure d'acquisition consiste à réaliser 25 mesures conventionnelles par variation de focus de la surface, associées à autant de configurations de direction d'illumination. Les éclairages utilisés consistent en 24 éclairages directionnels via un anneau de lumière pilotable par segments indépendants, plus un éclairage coaxial (lumière blanche). La répartition approximative des directions d'illumination, ainsi que les images de l'acquisition stéréophotométrique sont données dans la figure 5.10.

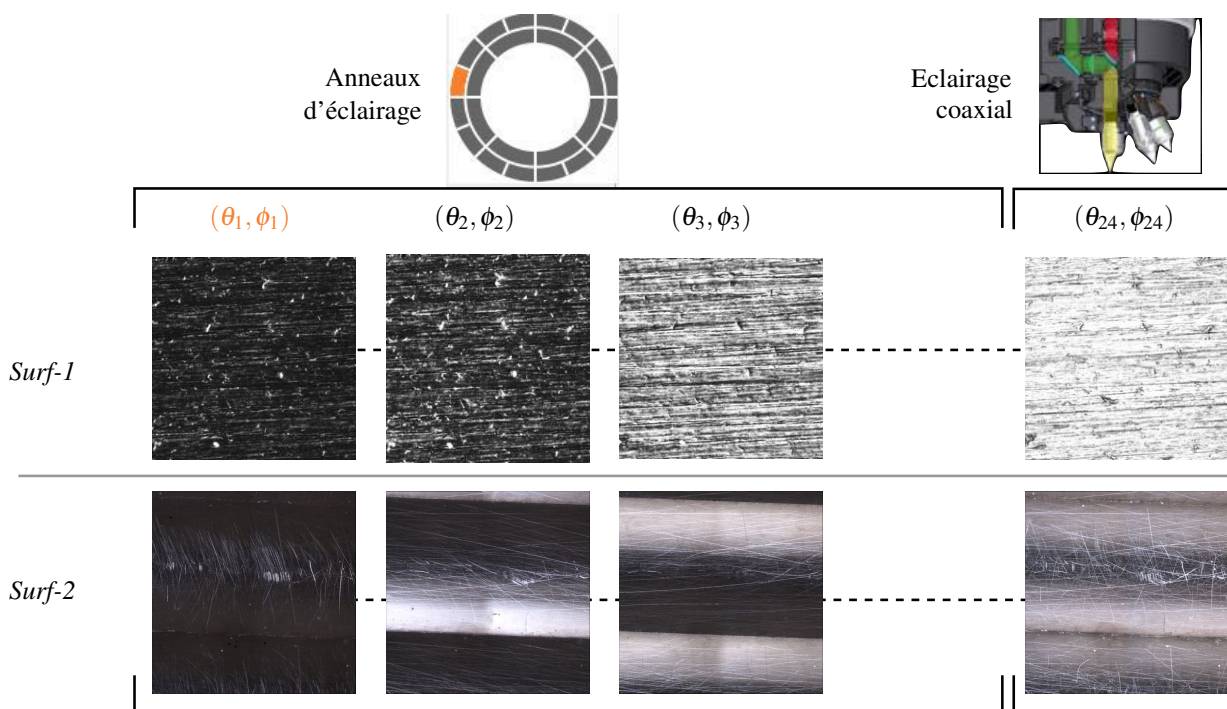


FIGURE 5.10 – Mesures RTI sur le microscope confocale Aicona Infinite Focus G5

### 5.3.2 Echantillons d'application

Cette approche est mise en œuvre sur deux états de surfaces morphologiquement distincts.

- *Surf-1* est une surface métallique brossée (figure 5.11a), dont les variations géométriques de forme sont d'amplitudes faibles comparées aux composantes d'ondulation et de rugosité. Une séparation de ces composantes via la Décomposition Modale Discrète est donnée dans la figure 5.11d. Son état de surface est composé globalement de deux populations distinctes ; on observe d'une part des stries de brossage suivant une direction principale (représentée par le diagramme de la figure 5.11c), et d'autre part des variations de formes locales plus isotropes (creux/bosses) réparties régulièrement sur la sur-

face. Ce type d'état de surface fortement anisotrope est fréquent pour les surfaces usinées, certaines variations de forme locale pouvant être la conséquence de phénomènes d'arrachement de matière lors du passage de l'outil et/ou liés à une non homogénéité du matériau.

La mesure a été réalisée avec un objectif  $\times 10$ , soit une zone de mesure de  $1.624 \times 1.624$  mm, comportant  $1840 \times 1840$  points de mesure (pas de stitching). La résolution latérale est d'approximativement  $4\mu\text{m}$  (X- et Y- axes) et la résolution verticale est approximativement de  $66\text{nm}$ , soit une taille de pixel d'environ  $0.78\mu\text{m}^2$ . Les surfaces sont illuminées en lumière blanche, via un double anneau d'éclairage piloté par segments indépendants, ou via un éclairage coaxial. La mesure 3D de la mesure réalisée sur cette surface est donnée sur la figure 5.11b.

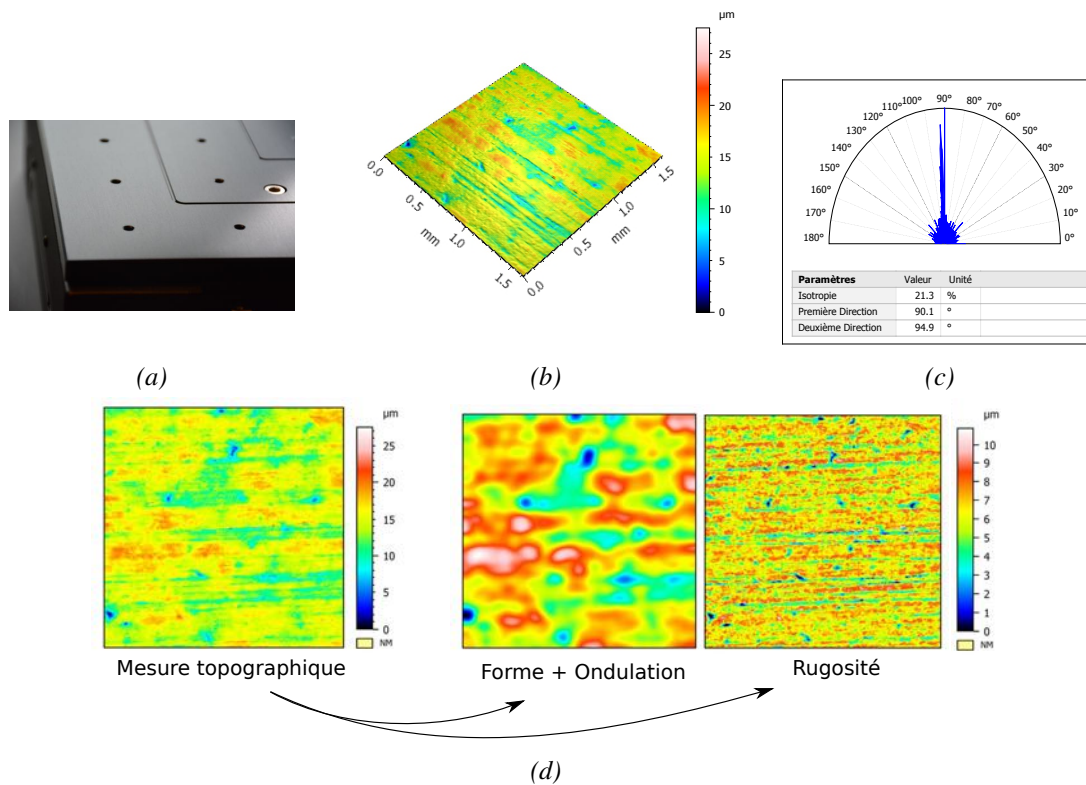


FIGURE 5.11 – (a) Echantillon Surf-1 : (b) Topographie, (c) directionnalité et (d) composantes texturales

— *Surf-2* est une surface métallique de briquet guillochée avec un motif linéaire vertical. Un revêtement par une couche de métal précieux est ensuite appliqué, puis la surface est polie en retouche finale à la main. Cette surface présente des variations géométriques de forme d'amplitude importante liées à l'opération de guillochage. A l'échelle de la rugosité, bien que la surface puisse être considérée *polie miroir*, on observe des anomalies locales de types coups/rayures sur la partie supérieure du motif en "v", et des anomalies de type arrachement de matière en fond de guilloche. Cette surface est morphologiquement distincte de *Surf-1*, et présente un intérêt particulier pour cette étude car elle fait apparaître une grande variété de pentes et de courbures locales.

La mesure a été réalisée avec un microscope équipé d'un objectif  $\times 5$ , soit une zone de mesure de  $3.060 \times 3.060$  mm comportant  $3468 \times 3468$  points de mesure (stiching  $2 \times 2$ ). Les résolutions latérale et verticale sont approximativement de  $7\mu\text{m}$  (X- et Y- axes) et de  $2\mu\text{m}$  (Z- axe). La surface est illuminée de la même façon que pour l'échantillon *Surf-1*. Une représentation 3D de la mesures réalisée sur cette surface est donnée dans la figure 5.12.

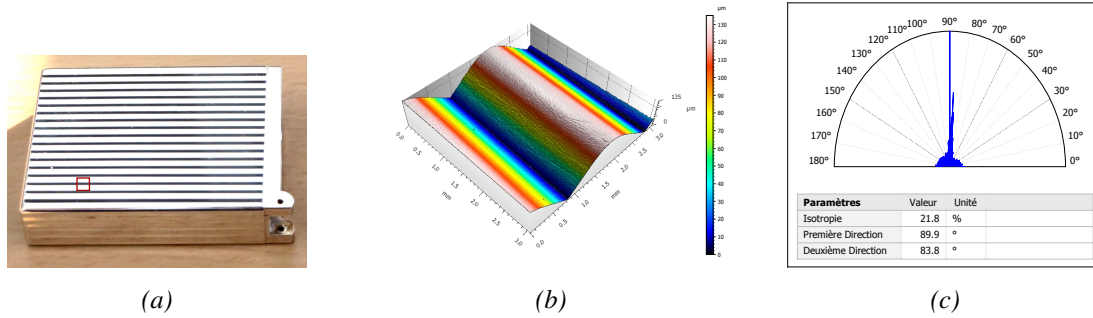


FIGURE 5.12 – (a) Echantillon Surf-2 : (b) Topographie, (c) directionnalité

### 5.3.3 Comparaison des approches

Une comparaison est réalisée avec les pentes calculées à même résolution à partir de la mesure en altitudes d'une part, et à partir des données stéréophotométriques d'autre part. Cette comparaison est essentielle pour comprendre l'intérêt et la pertinence d'une approche « lumière inverse » par rapport à une approche de métrologie dimensionnelle classique pour l'étude des surfaces en pentes et en courbures. Plusieurs facteurs sont en effet à prendre en compte :

- les pentes sont obtenues sans dérivation. L'approche stéréophotométrique a ainsi une faible sensibilité au bruit. Ceci est lié au fait que le capteur photosensible se comporte comme un intégrateur « physique » sur chaque pixel.
- De plus, pour chaque pixel, l'information mesurée est composée de  $m$  valeurs de luminance ( $m$  correspondant au nombre de configuration d'éclairage lors des acquisition RTI). La fusion de ces données pour estimer la normale en chaque pixel permet alors d'obtenir une résolution plus fine par rapport à l'approche classique où la normale en un point est calculée à partir des 8 pixels voisins du pixel.
- Enfin, les composantes de spécularité et de diffusion permettent d'accéder à des comportements lumineux sub-pixel. Une analogie de la vie quotidienne est la fenêtre que l'on voit « briller » au loin, alors qu'elle est géométriquement d'une taille très largement inférieure à la résolution de l'œil. Ce mode d'acquisition permet de mesurer plus directement la fonction d'aspect, i.e. l'effet créé par la géométrie de la surface et non la géométrie intrinsèquement.

### Mise en œuvre sur les surfaces *Surf-1* et *Surf-2*

La figure 5.13 présente pour l'échantillon *Surf-1* les comparaisons, à résolution équivalente, entre les cartographies de pentes obtenues :

- par dérivation des altitudes (mesure Alicona G5  $\times 50$ ),
- à partir des acquisitions stéréophotométriques réalisées avec le même capteur/grossissement.

Les cartographies des pentes suivant l'axe vertical  $D_y$  étant orthogonales à la direction des stries de brossage permettent d'observer la composante régulière de la texture. Tandis que les pentes suivant l'axe horizontal  $D_x$  de l'image jouent le rôle d'un filtre de la texture car la direction du gradient est colinéaire à la direction de la texturation. Cet effet de filtrage directionnel est similaire à celui qui est observé expérimentalement lorsqu'on fait tourner les directions d'illumination autour la surface. L'intérêt de ce filtrage directionnel est de pouvoir mettre en évidence les éléments et les arrangements spatiaux qui ont des comportements stochastiques ne suivant la structure régulière de la surface (figures 5.13b et 5.13d).

Comme les cartographies de l'approche stéréophotométrique sont obtenues sans opération de dérivation, l'information est visiblement plus riche comparativement à la technique consistant à mesurer puis à dériver



une information en altitude. L'approche stéréophotométrique nous donne ainsi une image plus perceptuelle des pentes et des courbures à la surface et moins restrictive. La mesure stéréophotométrique intègre le fait que l'on peut percevoir une région texturée différemment selon les directions d'illumination.

A ce titre, l'orientation est l'une des caractéristiques les plus discriminantes dans le cadre de l'inspection visuelle des surfaces. La directionnalité, de même que la périodicité, est identifiée comme l'un des attributs fondamentaux dans la perception des textures par le système visuel humain, avec l'échelle d'observation. La directionnalité et l'échelle (section 5.4.3) sont en effet fortement liées. Selon que l'on observe une texture directionnelle à une échelle plus ou moins grande, la perception de son orientation peut changer, ainsi que celle de son anisotropie.

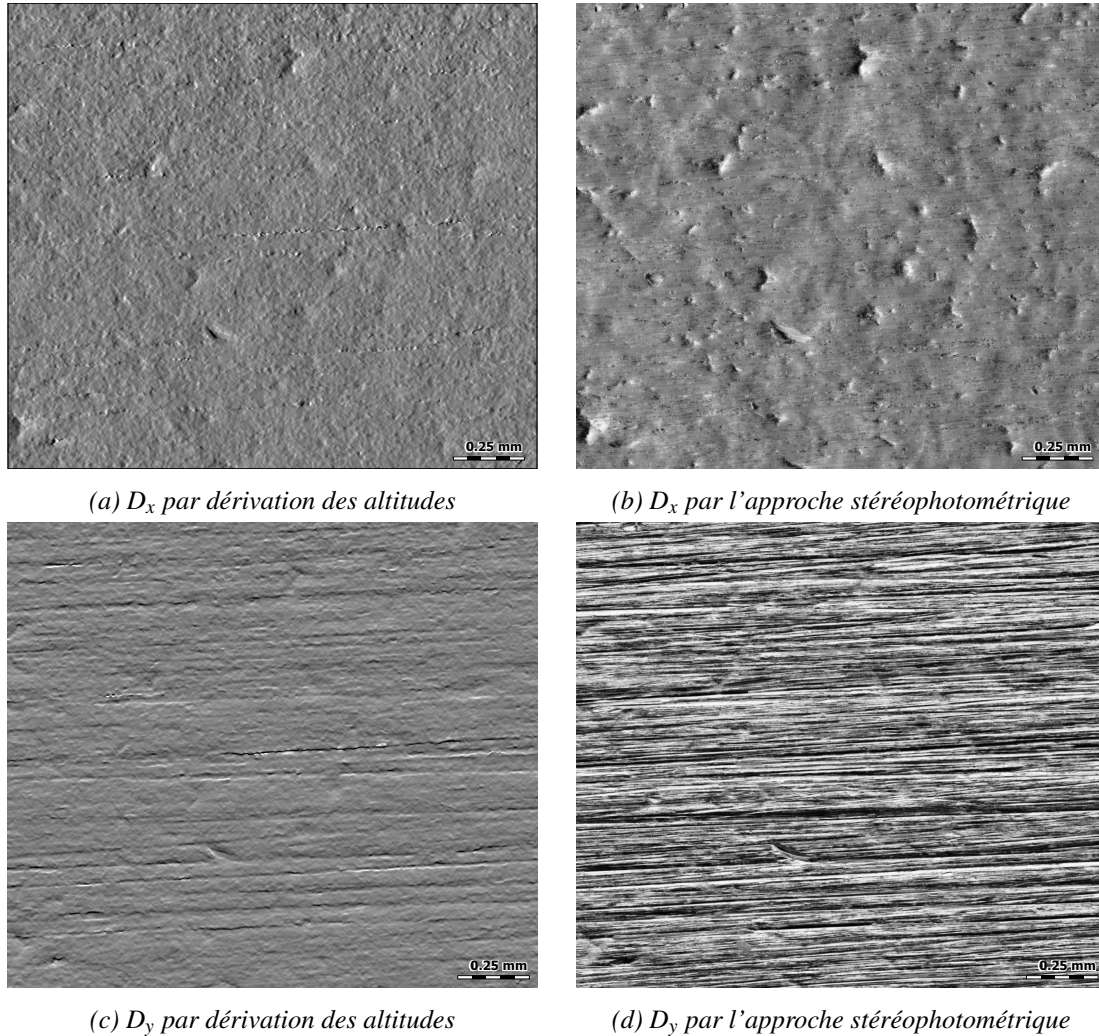


FIGURE 5.13 – Comparaison des approches pour l'estimation des pentes à la surface (**Surf-1**)

De la même façon que pour les pentes, nous pouvons observer sur la figure 5.14 à résolution identique que les acquisitions de type RTI permettent d'accéder de façon performante à l'information en courbures de la surface inspectée. A la différence de l'estimation des pentes, le calcul des courbures nécessite cependant ici une opération de dérivation, mais celle-ci apparaît comme peu sensible au bruit haute fréquence probablement du fait de l'intégration physique réalisée sur chaque pixel par le capteur d'acquisition.

La réflectivité locale va varier avec le taux (vitesse) de variation des pentes à la surface, i.e. les courbures. Le rayon de courbure des irrégularités de surface jouent un rôle prépondérant sur les directions de la réflexion spéculaire. L'identification de la courbure locale comme mesurande de la qualité d'aspect est



pertinente car elle élimine les composantes de forme associées aux composantes de premier ordre de la surface (courbure constante ou bien relativement faible) pour garder uniquement les changements géométriques brusques associés à des fines anomalies d'aspect ou aux arêtes de l'objet.

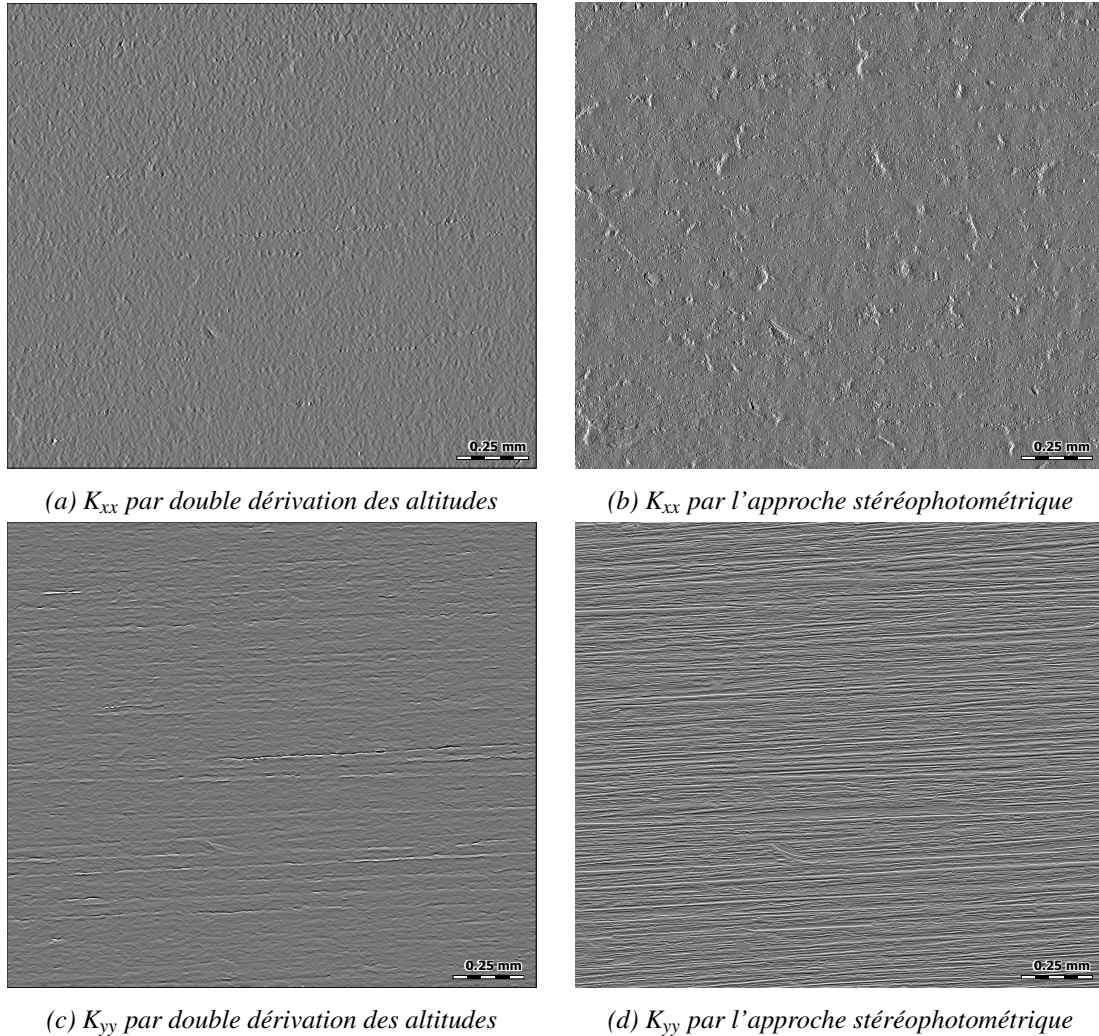
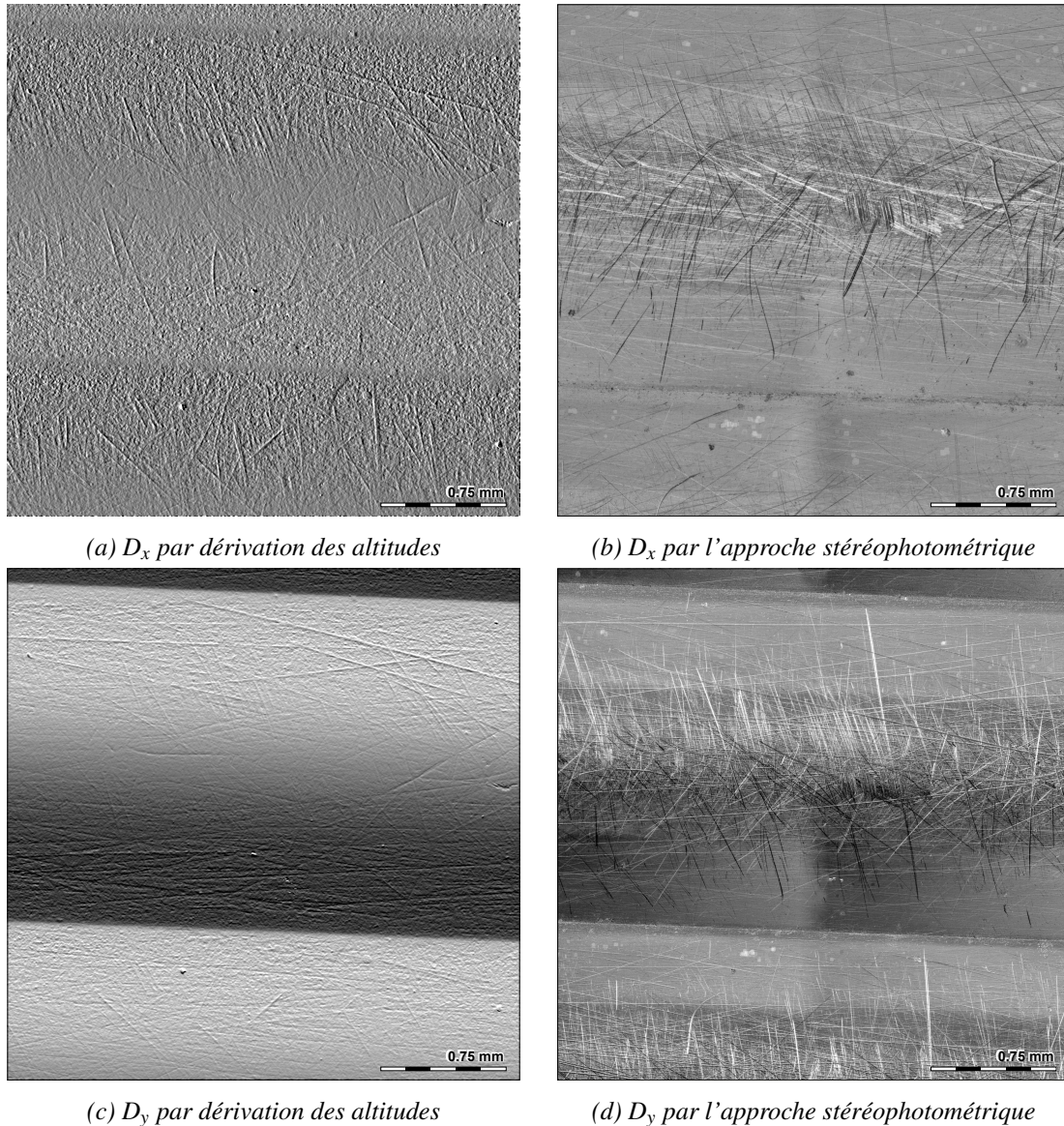


FIGURE 5.14 – Comparaison des approches pour l'estimation du tenseur de courbures (Surf-1)

Une étude comparative similaire est réalisée sur les cartographies obtenues à partir des données topographiques et photométriques de la surface *Surf-2*. Les cartographies de la figure 5.15 représentent les pentes de *Surf-2* obtenues en mettant en œuvre les deux approches. On constate que les rayures observables à la surface de l'échantillon sont en quantité plus nombreuses sur les cartographies en pentes obtenues par l'approche stéréophotométrique. De plus, on remarque que les caractéristiques les plus saillantes ne sont pas associées aux mêmes coups ou rayures comparativement entre les figures 5.15a et 5.15b ( $D_x$ ), et entre les figures 5.15c et 5.15d ( $D_y$ ).

Certains détails très fins de la surface semblent correctement retrouvés. Cela confirme qu'il n'est pas utile d'introduire un modèle de réflectance compliqué pour retrouver la microstructure des surfaces spéculaires : un modèle simple tel que le modèle Lambertien sur lequel est basé l'équation classique de la stéréophotométrie, couplé à des éclairages contrôlés, suffit à observer les détails très fins, et au besoin, les mesurer sur les cartographies en pentes et en courbures.



FIGURE 5.15 – Comparaison des approches pour l'estimation des pentes à la surface (**Surf-2**)

La dérivation numérique des pentes de la figure 5.15 détermine la cartographie des intensités de courbure locale de la figure 5.16. Sur les cartographies en courbures obtenues par deux dérivations successives des altitudes mesurées, on constate que les données sont fortement bruitées comparativement aux courbures calculées par l'approche stéréophotométrique, ce qui les rendent souvent inexploitable<sup>1</sup>. L'intérêt de l'approche stéréophotométrique pour l'obtention des courbures est d'autant plus marqué sur la surface *Surf-2* par rapport à *Surf-1* car on y observe mieux l'effet de filtrage de forme qui sépare des composantes de grande longueur d'onde des composantes à courte longueur d'onde. On filtre ainsi la forme et l'ondulation associées au motif en "v" engendré par la gravure du guillochage, pour observer uniquement la micro-rugosité.

1. Nous avons gardé les images de ce chapitre en pleine résolution. De ce fait, nous conseillons au lecteur d'agrandir les figures pour observer les surfaces dans les mêmes conditions qu'un contrôleur observerait la surface sur le logiciel *MsaTool*<sup>®</sup>, c'est-à-dire en plein-écran avec la possibilité de zoomer à sa guise sur les régions d'intérêt. Pour cette raison, une version imprimée du document n'offrira pas un contraste spatial suffisant pour visualiser ces cartographies qui n'ont subi aucune transformation afin de ne pas altérer la nature des données. Des techniques en traitement d'images peuvent néanmoins permettre de rehausser de manière optimale la plage dynamique d'une image à l'instar de l'approche Logarithmic Image Processing (LIP) [Jourlin 95].



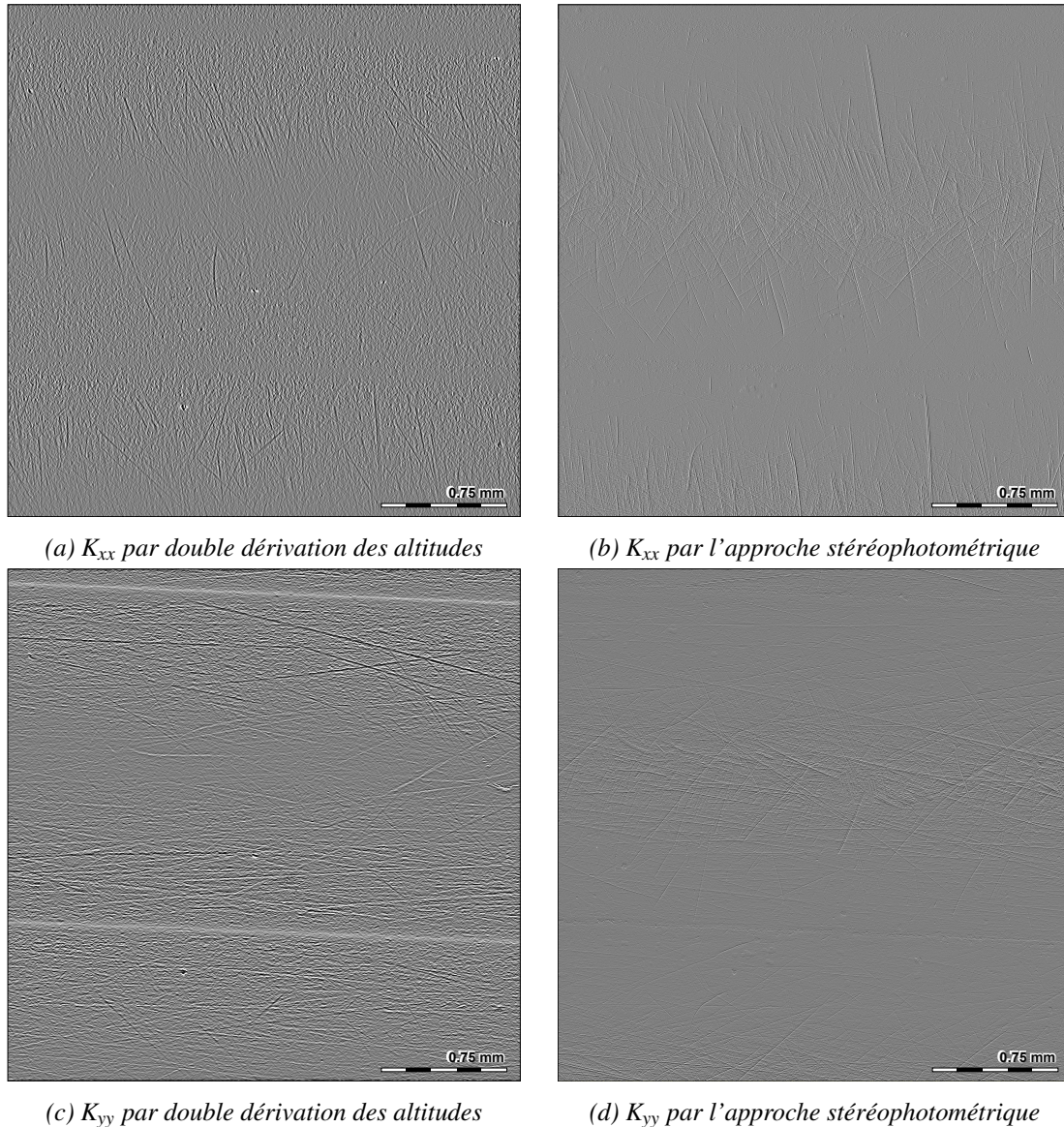


FIGURE 5.16 – Comparaison des approches pour l'estimation du tenseur de courbures (**Surf-2**)

Ces cartographies du champ de normales et de courbures offrent une représentation très pratique pour observer la géométrie globale de la surface. L'analyse de la texture peut être réalisée de manière virtuelle sur le relief de texture récupéré, venant en support aux experts lors du contrôle de la qualité d'aspect. L'analyse reste donc centrée sur le "viewer" *MsaTool*<sup>®</sup> qui apporte de nouvelles connaissances sur les surfaces des pièces inspectées. L'expert joue donc un rôle central dans cette approche.

### 5.3.4 Autres applications

Nous proposons dans cette section d'autres surfaces d'application pour la visualisation des courbures. L'acquisition de ces échantillons a été réalisée au moyen de la Sphère MeSurA. Nous montrons que les cartographies en courbure obtenues permettent d'isoler rapidement dans la composante de rugosité les éléments surfaciques qui sont des anomalies d'aspect. On fournit une vue en rendu photoréaliste dans une direction d'éclairage choisie arbitrairement, ainsi qu'une représentation de la courbure directionnelle dans deux directions qui ont été sélectionnées après une exploration rapide des différents angles pour mettre en évidence certaines caractéristiques saillantes de la surface.

- (a) **Roulement de type « tonneau ».** Un contrôle d'aspect est réalisé avant montage du roulement, pour ne pas détériorer les bagues intérieures et extérieures des roulements. Ici l'anomalie détectée est un coup, dû à des chocs entre les roulements lors du processus de fabrication.
- (b) **Trièdre en bois.** On peut observer des stries sur la surface dues au passage de l'outil de coupe. En se plaçant dans l'orientation des stries, on arrive à les filtrer de la texture pour observer des rayures transversales sur les trois faces visibles du trièdre.
- (c) **Doigt.** L'empreinte digitale constitue un procédé d'identification des individus du fait de leur quasi-unicité et leur caractère aléatoire. La courbure est particulièrement intéressante pour observer les boucles, les verticilles, et les arcs qui composent les traces digitales. Actuellement, la plupart des scanners d'empreintes sont basés sur des lecteurs tactiles par apposition du doigt sur un support.

Ces mesures permettent d'illustrer l'intérêt de conserver l'orientation pour la représentation de la courbure dans le cadre d'une mesure de l'aspect et de l'examen des motifs directionnels qui composent la surface.

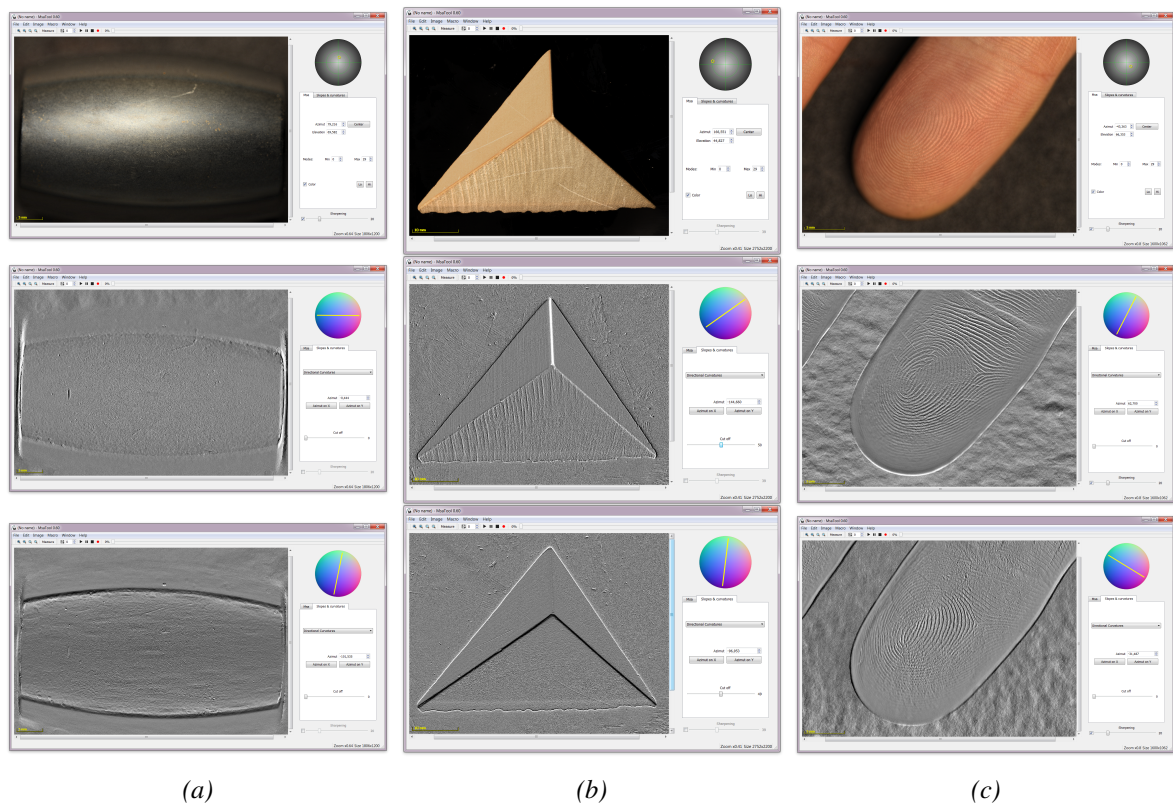


FIGURE 5.17 – Courbures directionnelles à partir de 3 surfaces d'application différente

## 5.4 Caractérisation des types de forme de la microstructure

Nous discutons dans cette partie des voies d'investigation afin d'entreprendre une classification des formes locales, à partir de ces données. Les cartographies obtenues et les concepts proposés constituent une base utile pour une approche novatrice de l'analyse texturale et des rugosités de surface. Nous souhaitons établir un certain nombre de similitudes intéressantes entre la forme d'éléments donnés sur la surface et

leur signature dans l'espace des pentes et des courbures. Nous avons montré dans la section 4.5.3 que la forme décrite par la surface de luminance ne peut pas être utilisée pour établir une relation avec la forme de l'élément géométrique qui a induit cette répartition de la luminance lors de la réflexion lumineuse.

### 5.4.1 Association des normales et de la forme locale

La distribution du gradient peut être utilisée pour définir la signature de la forme d'une caractéristique locale donnée. Le concept de l'espace de gradient facilite ainsi la mise en correspondance d'un ensemble de normales à la surface représentées par les points de coordonnées  $(p, q)$  dans l'espace de dimension 2 du gradient, où  $p$  et  $q$  décrivent la pente de la surface locale à un endroit donné. Cette approche est proposée dans [Smith 99b] sur des surfaces virtuelles réalisées au moyen d'un logiciel de C.A.O. A titre d'exemple, la figure 5.18 illustre le cas d'une surface plane idéalisée, toutes les normales de surface observées sont parallèles à l'axe optique. Ainsi lorsque celles-ci sont portées dans l'espace 2D du gradient, elles apparaissent comme un ensemble de points situés précisément à l'origine. L'utilisation de cette représentation permet d'envisager une caractérisation des discontinuités de la surface car la distribution fournit une indication sur la nature géométrique du défaut observé.

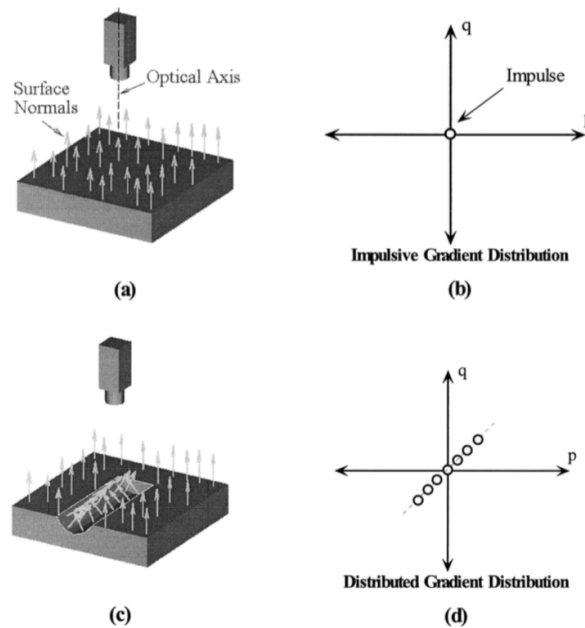


FIGURE 5.18 – Espace de représentation du gradient [Smith 99b]

Smith a réalisé trois types d'anomalies d'aspect avec des formes caractéristiques dessinées en C.A.O et il a déterminé le graphe du gradient qui leur est associé, dans le but de discriminer leur forme respective. Pour le cas d'une rainure avec une section en "v" (figure 5.19a), la représentation du gradient montre une caractéristique linéaire orientée orthogonalement au sens de la rainure. Dans le second cas (figure 5.19b), on observe un graphe différent duquel on peut déduire de manière approximative l'orientation principale de l'outil de coupe qui a engendré la rainure incurvée. Dans le dernier cas (figure 5.19c), on observe une caractéristique axisymétrique avec une large distribution du gradient. On peut trouver toutefois des exemples pour lesquels on obtient une répartition identique alors que les formes considérées sont différentes. Il est donc nécessaire de prendre en compte d'autres attributs spatiaux pour progresser vers l'automatisation de la reconnaissance de certaines typologies d'anomalie. On peut par exemple compléter ces descripteurs du gradient par les moments de la distribution spatiale des pixels de l'élément considéré dans le plan de l'image,



pour faciliter leur identification.

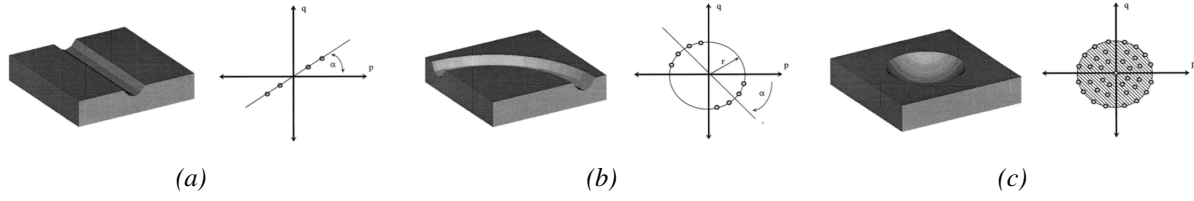


FIGURE 5.19 – Signatures de topologie particulière de défaut [Smith 99b]

### 5.4.2 Indice de forme (Shape Index) et intensité de courbure (Curvedness)

Une approche différente est possible en utilisant l'information en courbure. L'indice de forme (*Shape index*) a été défini pour caractériser par type la forme locale d'une surface, tandis que l'intensité de courbure (*Curvedness*) fournit une valeur scalaire du niveau de courbure locale indépendamment de la forme [Koenderink 92, Koenderink 03]. Leurs expressions sont données respectivement par les équations 5.14a et 5.14b. La figure 5.20 et le tableau 5.4.2 permettent d'associer à ces valeurs le type de forme locale que la surface décrit à l'endroit où sont calculés ces deux indicateurs.

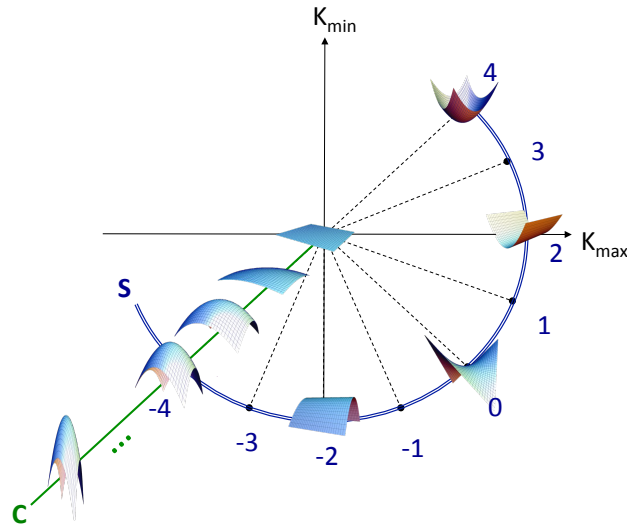
$$s = -\frac{2}{\pi} \arctan \frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2} \quad \text{où } k_1 \geq k_2 \quad (5.14a)$$

$$c = \sqrt{\frac{k_1^2 + k_2^2}{2}} = \sqrt{\frac{I_1^2}{2} - I_2} \quad (5.14b)$$

Type de surface	Intervalle de l'indice de forme	Label
Spherical cup	$s \in [-1, -7/8]$	$T = -4$
Spherical cap	$s \in [7/8, 1]$	$T = 1$
Through	$s \in ]-7/8, -5/8]$	$T = -3$
Dome	$s \in [5/8, 7/8]$	$T = 2$
Rut	$s \in ]-5/8, -3/8]$	$T = -2$
Ridge	$s \in [3/8, 5/8]$	$T = 3$
Saddle rut	$s \in ]-3/8, -1/8]$	$T = -1$
Saddle ridge	$s \in [1/8, 3/8]$	$T = 4$
Saddle	$s \in ]-1/8, 1/8]$	$T = 0$
Plan	$s \in [-1, -7/8]$	$T = 5$

TABLE 5.1 – Type de surface locale et indices de forme (Shape index) [Zhao 10, Koenderink 92]



FIGURE 5.20 – Shape Index ( $s$ ) and Curvedness ( $c$ )

Des résultats montrent qu'il est possible de segmenter la forme d'objets physiques 3D maillés par des faces triangulaires, à partir de ces indicateurs [Zhao 10] pour des applications en informatique graphique orientée C.A.O. Cette approche très intéressante, est hélas limitée lorsqu'il s'agit de sa mise en œuvre sur des surfaces réelles de par la nature de la microrugosité qui est située dans la plage des hautes fréquences spatiales. En outre le bruit présent dans ces cartographies qui décrivent des variations très rapides de la géométrie rend difficile une discrimination robuste de la forme locale par cette approche. Des développements qui pourront venir compléter la méthode sur l'aspect multi-échelle devraient pouvoir rendre l'association possible dans le cas des surfaces rugueuses.

### 5.4.3 Approche multi-échelle : courbures et aspect des surfaces

L'approche qui consiste à se focaliser sur la courbure calculée au niveau du pixel n'est pas suffisante. On doit déterminer la quantité totale de courbure sur une région donnée pour garantir la réussite des méthodes de caractérisation de forme locale présentées précédemment qui visent à établir des correspondances géométriques et perceptuelles. L'idée générale est d'effectuer des « zooms » sur les zones critiques et de simplifier là où la description de la surface varie peu pour pouvoir appliquer facilement ces méthodes aux surfaces rugueuses. Il semble assez clair que la perception visuelle traite des images sur plusieurs niveaux de résolution en même temps : l'œil accommode différemment en fonction de la complexité des détails sur la surface. Or l'observation physique est mesurée à l'aide de caméras avec certaines ouvertures, taille de capteur, ..., qui conditionnent les connaissances dont on dispose sur les courbures, et de manière plus générale sur l'apparence de la surface. En pratique, le choix de la résolution spatiale est souvent appréhendé de manière empirique, en fonction de la taille des objets et des types de structure à observer, pour conduire à l'identification visuelle de l'information utile dans le cadre d'objectifs définis *a priori*. Par conséquent, l'information acquise à partir d'un système classique de vision industrielle est de nature incomplète en terme d'échelle de description. Plusieurs approches sont possibles pour conduire une étude multi-échelle et une modélisation multi-physique (courbures, comportement lumineux, etc.) afin de décrire plus fidèlement la perception visuelle des surfaces aux différentes échelles.

L'approche directe consiste à avoir une série de mesures en utilisant des objectifs physiques différents correspondant à des échelles différentes. On peut obtenir ainsi une mesure multi-échelle des données. Cette voie est faisable à l'aide du précédent système d'acquisition (Alicona Infinite Focus) mis œuvre dans la section 5.3.1 qui permet de changer facilement les modules de grossissement disponibles ( $\times 5, \times 10, \times 20, \times 50$ )

afin de travailler à différentes résolutions latérales et verticales en conservant la localisation aux différentes échelles. Une telle approche est particulièrement intéressante dans un but de recherche cependant sa mise en œuvre pour des applications industrielles est limitée en raison principalement des temps d'acquisition et du volume de données à traiter. Un exemple d'acquisition avec le système Alicona sur une zone de surface issue d'un processus d'abrasion est présenté dans la figure 5.21. Seule la vue avec l'éclairage co-axial est donnée. Trois échelles distinctes sont représentées avec leur carte de saillance respective, calculée selon l'approche modale à partir du lot d'acquisition RTI correspondant (incluant 25 images refocalisées).

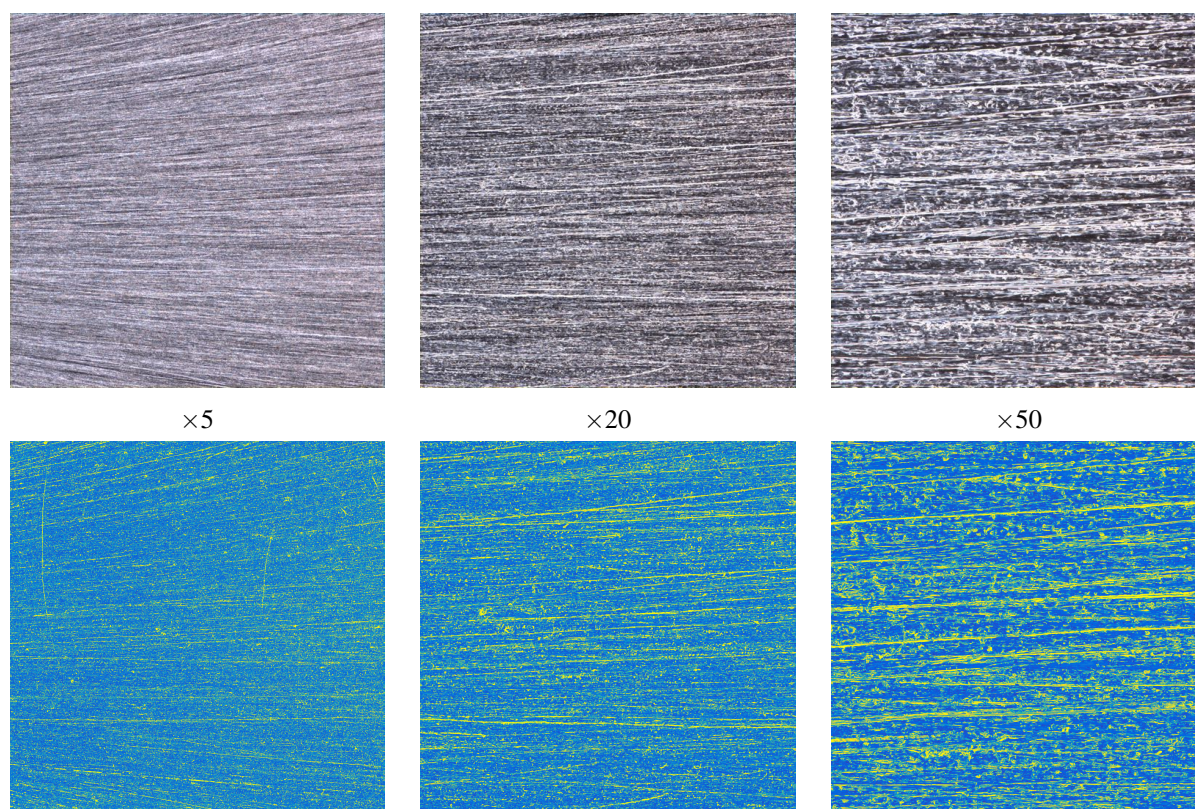


FIGURE 5.21 – Représentation multi-échelle d'une surface issue d'un processus d'abrasion : l'image en éclairage co-axial (en haut) et la carte de saillance obtenue par l'approche modale à partir du lot d'acquisition RTI correspondant (en bas), en fonction du grossissement

Une seconde approche est basée sur un concept de *causalité*. Koenderink [Koenderink 84] a introduit la notion de causalité qui stipule que les caractéristiques de l'image à une échelle sont toujours issues de ces caractéristiques à une échelle plus fine. On trouve quelques exemples dans la littérature de modélisation de l'apparence basée sur le comportement de la surface mesurée à une échelle microscopique, le but étant de retrouver le niveau macroscopique en faisant l'intégration de chaque élément dont on connaît complètement ou partiellement la BRDF, par rapport à la structure et la géométrie de la surface. Un exemple de ce type d'approche est proposé dans [Kotani 99] où le rendu macroscopique de pétales de rose est reconstruit à partir de la microstructure du pétale observé au microscope. Similairement, Berthier [Berthier 10] propose une modélisation multi-échelle de l'apparence iridescente des ailes de papillon en considérant des mesures à plusieurs niveaux d'échelles allant de l'échelle moléculaire avec les pigments, mesurée en angström, jusqu'à l'échelle macroscopique. Dalla Costa [Costa 07] propose une méthode originale basée sur des hypothèses de la théorie de l'information et sur le formalisme multi-fractal pour quantifier le degré de similitude d'un ensemble d'images d'une surface générée au moyen d'une fonction fractale 3D simulant un

processus d'abrasion, aux différentes échelles de longueur. Toute la difficulté de ces concepts est de lier les différents niveaux de résolution de description en utilisant la bonne information pour passer d'une échelle à l'autre sans discontinuité.

La carte de saillance obtenue par l'approche modale peut permettre une stratégie de calcul de la courbure locale efficace en adoptant la bonne plage d'échelle en fonction des zones à décrire. Autrement dit, les éléments saillants sur la surface seraient les données d'entrée d'une procédure de calcul de la courbure avec des paramètres d'échelle auto-adaptatifs. Les zones identifiées comme étant d'aspect similaire seraient simplifiées en rééchantillonnant ces régions de manière moins raffinée. À l'inverse, on conserverait une échelle suffisamment fine aux endroits où il y a des variations importantes d'aspect de façon à préserver les frontières tout en réduisant le bruit dans les zones uniformes. Cette approche diffère des représentations multi-échelle usuelles en traitement d'images (pyramides, ondelettes, etc) où les échelles sont définies et fixées a priori pour tous les points de l'image. Autrement dit, pour ces méthodes, les échelles restent indépendantes aux structures locales de l'image, relatives aux informations (pentes et courbures) que l'on cherche à extraire. Il existe différents outils pour déterminer les fenêtres d'analyse adéquates, en taille et en forme, à utiliser, selon le contexte local du voisinage de chaque point de l'image : les partitionnements récursifs (les *quad-tree* ou arbres quaternaires, la polygonisation de Voronoï,...), les pyramides de graphes basées sur la théorie des graphes, les approches *scale-spaces* basées sur le principe de causalité de Koenderink, ou encore les filtrages à voisinage variable ou géodésiques.

L'intégration des cartes de saillance pour définir localement les bonnes échelles à utiliser peut ainsi conduire à une analyse multi-échelle spatialement plus significative et pertinente par rapport aux propriétés physiques et psychophysiques de la surface à étudier.

## 5.5 Conclusion

Si les courbures suscitent un intérêt important au niveau scientifique et d'applications industrielles, cette caractéristique géométrique reste rarement utilisée. L'une des raisons est sans doute que cette mesure est difficile à acquérir, du fait de la sensibilité de l'opération de dérivation numérique aux composantes très hautes fréquences, et plus particulièrement dans notre cadre au bruit potentiellement présent dans la mesure, et à la présence de points aberrants. Pour obtenir des cartographies en courbures significatives, nous avons montré la pertinence de l'approche stéréophotométrique vis-à-vis d'une approche dimensionnelle classique.

Nous avons ainsi montré comment le champ de vecteurs de normale à une surface et les courbures peuvent être calculés à partir d'acquisitions stéréophotométriques. Cette méthode permet de créer des cartes de courbure de la surface que nous utilisons pour mettre en évidence les ruptures dans la continuité de la forme ou de la réflectivité de la surface corrélées aux anomalies d'aspect. Les cartographies obtenues améliorent significativement le rapport signal-bruit par rapport à l'approche conventionnelle qui consiste à dériver deux fois la mesure topographique, et permettent d'accéder de façon robuste à des détails fins de la micro-géométrie de la surface.

Pour introduire l'observateur dans ce cadre, nous avons développé une application de courbure directionnelle qui peut aider à déterminer la qualité de l'aspect de surface d'une part, et d'autre part à caractériser géométriquement les éléments de la microstructure de la surface. Ces indicateurs préservent la directionnalité et séparent efficacement les composantes périodiques et non-périodiques sur la surface inspectée, autrement dit d'isoler les événements locaux qui ne font pas partie de la texture régulière souvent associées aux anomalies d'aspect.

De manière générale, les anomalies d'aspect se traduisent par une déviation de la forme de la surface par rapport à sa forme nominale et l'origine de la déviation est traçable dans une certaine mesure. Si un mécanisme de causalité peut être identifié, alors une analyse quantitative des pentes et des courbures de ces défauts peut être utilisée comme base pour la commande automatique du processus de fabrication.

Une discussion et une réflexion sur des développements futurs ont été menées pour aboutir à une caractérisation géométrique automatique des éléments critiques sur la surface. L'approche envisagée est basée sur une analyse multi-échelle, l'idée générale étant de pouvoir adapter l'échantillonnage des cartographies en tenant compte de la complexité locale des formes présentes à la surface de l'échantillon. Pour cela, l'approche consiste à estimer la carte de saillance selon le principe décrit dans le chapitre 4 en utilisant le paramétrage particulier de la DMD, afin de mettre en évidence les zones critiques. Le but est d'assurer le regroupement des pixels de manière pertinente et d'éviter le lissage des données utiles, en rééchantillonnant de façon structurée l'information. L'adaptation de la discrétisation au niveau des régions critiques doit permettre de conduire une caractérisation géométrique basée sur les indicateurs de courbures équivalentes.

## Conclusion et perspectives

Nous avons cherché, dans cette thèse, à quantifier l'apparence des surfaces en établissant des corrélations entre des grandeurs physiques pertinentes, et à en proposer une modélisation fine. L'idée générale est de ne plus considérer l'image d'une surface uniquement dans un plan  $(u, v)$  mais dans un espace 3D  $(u, v, \text{éclairage})$  où la dimension associée à l'*éclairage* permet d'explorer la surface virtuellement sous une direction d'éclairage choisie. Cette exploration de la surface permet d'enrichir très sensiblement les données et la compréhension des interactions locales de la lumière avec la surface par rapport à une unique prise de vue, ou par rapport à une mesure de topographie conventionnelle. La mise en œuvre de cette modalité d'acquisition est réalisée selon le principe des techniques appelées **Reflectance Transformation Imaging**. Le dispositif automatisé d'acquisition permet d'obtenir pour chaque pixel un ensemble de valeurs discrètes de luminance associées à chaque incidence d'éclairage du dispositif d'acquisition. Une estimation réduite de la composante angulaire du coefficient de luminance bi-directionnel (BRDF) est réalisée pour chaque micro-facette constituée par un pixel, en associant à ces valeurs discrètes un modèle géométrique continu d'approximation de forme. Cette paramétrisation permet donc de reconstruire virtuellement le rendu de la surface associé à la direction d'éclairage choisie, et ainsi de mettre en évidence la micro-géométrie de la surface. Cette démarche permet en particulier de mieux décrire le comportement lumineux local au niveau des ruptures de continuité de forme et de réflectivité associées à la présence d'anomalies d'aspect.

La métrologie de l'aspect passe par un processus de standardisation qui consiste à réduire la complexité humaine à des paramètres influents, à des standards. En ce sens, le déploiement de la technique RTI peut être vu comme la formalisation des pratiques actuelles des contrôleurs humains en entreprise qui manipulent les objets en faisant varier les angles d'observation et d'incidence de la lumière, afin de mettre en évidence les éventuelles anomalies d'aspect présentes sur la surface. Nous avons cherché à rationaliser la démarche d'inspection et à automatiser les tâches qui peuvent l'être pour réduire la variabilité des résultats lors des 3 étapes du processus d'inspection qualité des surfaces : l'exploration, l'évaluation et la décision. La conception d'un prototype reprenant l'architecture native des dispositifs d'acquisition RTI (un dôme d'éclairage) a permis d'identifier les principales voies d'améliorations et limitations comme instrument de mesure industriel. Cette recherche a abouti à la réalisation d'un second dispositif d'acquisition, appelé **Sphère MeSurA**, adapté à de nombreux besoins/applications industriels. La **Sphère MeSurA** dispose de plusieurs points de vues qui permettent de faciliter l'inspection des pièces de révolution ou de forme complexe et limite les manipulations. De plus, nous avons apporté une attention particulière à la maîtrise des sources d'éclairage. Un réglage fin en position des sources lumineuses permet notamment d'ajuster l'orientation du faisceau lumineux de chaque LED sur la zone d'intérêt.

La modélisation locale de l'interaction surface/lumière peut être réalisée en appliquant différentes pa-



ramétrisations géométriques, comme par exemple la technique Polynomial Texture Mappings (PTM) ou la décomposition en Harmoniques Hémisphériques (HSH). Ces approches sont performantes pour décrire le comportement lumineux des surfaces Lambertiennes, mais la description du brillant et plus généralement des comportements plus complexes observés à l'endroit des anomalies locales est souvent peu conforme à la perception réelle. La mise en place de la **Décomposition Modale Discrète (DMD)** nous a permis d'approcher plus finement les variations des luminances qui sont captées par le système visuel humain pour élaborer son appréciation de la qualité de la surface.

Le paramétrage modal permet d'étudier tout type de réflexion lumineuse et de caractériser l'aspect des surfaces réelles différentes à l'aide des descripteurs et des espaces de représentation. Néanmoins, nos travaux se sont focalisés sur une application restreinte de la problématique d'aspect qui concerne la détection et l'évaluation objectives des anomalies d'aspect, à laquelle nous apportons des solutions. Pour y parvenir, nous avons introduit un paramétrage particulier qui permet de séparer l'information de phase et d'amplitude des vecteurs modaux. Les amplitudes modales obtenues, invariantes en rotation, posent les bases de notre approche pour estimer la similarité et la dissimilarité et fournissent une représentation discriminante des données. L'image est indexée par un ensemble de vecteurs d'amplitudes modales se rapportant à la forme géométrique des surfaces de luminance reconstruites en chaque point de la surface. Il se pose alors le problème de comparaison de ces vecteurs afin de fournir une valeur numérique reflétant le fait que les apparences décrites sont plus ou moins proches. Nous avons opté pour l'utilisation de la distance de Mahalanobis qui prend en compte la variance et la corrélation de la série des vecteurs d'amplitudes. Nous obtenons à l'issue de cette chaîne de mesure de l'aspect des cartographies de distance qui mettent en évidence les éléments de la surface qui ont la qualité d'être saillants en terme d'impact visuel, i.e. les anomalies d'aspect. Le paramétrage modal a permis également de proposer des attributs pour mieux évaluer l'importance des anomalies d'aspect détectées en terme de visibilité.

A partir des mêmes données de l'acquisition RTI, l'estimation du champ de normales est fournie par la résolution de l'équation générale de la stéréophotométrie. Cette approche nous permet de caractériser géométriquement les éléments sur la surface qu'ils soient aléatoirement ou régulièrement structurés. Nous avons montré de manière expérimentale l'intérêt d'une approche « lumière inverse » pour l'estimation du champ de normales à la surface par rapport à la technique classique qui consiste à dériver l'information en altitudes de la mesure topographique réalisée avec un moyen de mesure 3D. Les cartographies de pentes et courbures obtenues par ces approches distinctes sont comparées à même résolution en mettant en oeuvre la technique RTI sur un microscope à focalisation étendue *Alicona Infinite Focus G5*. Afin d'être en mesure de procéder à une analyse de surface, il est d'abord nécessaire de saisir une représentation appropriée de la surface observée. Dans ce sens nous avons défini des indicateurs en pentes et en courbures qui préservent l'information d'orientation et facilitent l'interprétation des propriétés texturales et géométriques des surfaces inspectées, souvent composées de répétitions de motifs anisotropes. Ces cartographies tiennent compte de la dépendance des caractéristiques d'une texture de surface avec la direction d'analyse, et permettent une séparation efficace des composantes périodiques et non-périodiques de la surface.

Finalement, la facilité et la rapidité de ces approches permettent d'examiner de manière performante l'aspect des surfaces et de proposer des grandeurs en lien avec la fonction d'apparence de la surface inspectée. L'acquisition et la modélisation des interactions lumière/surface permet d'accéder à une information riche qui décrit plus fidèlement l'aspect d'une surface en extrayant des surfaces de luminance les facteurs influents qui entrent en jeu dans la perception visuelle. Les cartographies de pente et de courbure permettent quant à elles de caractériser géométriquement la texture et les événements locaux observables sur la surface. Les développements autour de ces deux approches « lumière » et « géométrique » sont rassemblés dans un logiciel d'expertise appelé *MsaTool*<sup>®</sup>. Les experts et les contrôleurs peuvent ainsi basculer entre les différentes représentations de la surface sur le visualisateur, obtenir une connaissance technique sur les aspects



de surface, et mieux comprendre les interactions entre la perception de la surface et la BRDF, la BRDF et la géométrie, et *in fine* la géométrie et les procédés de création de la surface.

## Nos apports

Les apports de nos travaux sont :

- ☞ La démarche de conception d'un dispositif RTI, appelé ***Sphère MeSurA***, dédié à l'acquisition et la modélisation de l'apparence des surfaces.
  - Les améliorations matérielles par rapport aux dispositifs RTI existants : la maîtrise des sources d'éclairage, l'extension des points de vue et la rapidité de l'acquisition.
  - La définition de spécifications pour la caractérisation du dispositif comme instrument de mesure industriel.
  - Le développement des logiciels (application Matlab et application finale *MsaTool*<sup>®</sup>) intégrant les méthodes de traitement des données stéréophotométriques RTI.
- ☞ La mise en œuvre d'un paramétrage de forme appelé la ***Décomposition Modale Discrète (DMD)*** comme méthode d'approximation des surfaces de luminance.
- ☞ Une analyse de la qualité de reconstruction RTI pour montrer l'intérêt et les performances de la DMD comparativement aux modélisations existantes, associées à une famille de fonction polynômiale de second ordre (PTM) et à une base vectorielle constituée d'harmoniques hémisphériques (HSH).
- ☞ Un changement de paramétrage de la DMD pour obtenir des descripteurs invariants à la rotation afin de considérer comme identique deux surfaces de luminance symétriques.
- ☞ Une mesure de la similarité d'aspect basée sur la distance de Mahalanobis calculée sur les données issues du changement de paramétrage.
- ☞ L'extraction d'une carte de saillance spatiale permettant d'identifier automatiquement les anomalies d'aspect à partir des données modales qui contiennent l'information où est codée l'aspect de la surface dans les différentes conditions d'illumination.
- ☞ La proposition d'attributs extraits des données modales, qui corréleront le plus possible avec l'appréciation visuelle humaine, pour l'évaluation des anomalies d'aspect :
  - L'expression du contraste de luminance entre la caractéristique détectée et son voisinage.
  - Une cartographie polaire indiquant les angles d'incidence de la lumière pour lesquelles la caractéristique est visible.
- ☞ Une estimation robuste et rapide des courbures à la surface en limitant l'effet du bruit lié aux opérations de dérivations.
- ☞ L'expression d'indicateurs de pentes et de courbures qui préservent l'information d'orientation afin de séparer efficacement les composantes périodiques et non-périodiques de la surface.

## Les perspectives

Ces travaux ouvrent la voie à de nombreux développements :

- ☞ **Implémentation des algorithmes de détection des anomalies d'aspect dans le logiciel *MsaTool*®** A court terme, la méthodologie de détection automatique des anomalies d'aspect et les attributs d'évaluation proposés dans nos travaux seront intégrés au logiciel *MsaTool*® venant compléter les outils d'analyse de l'aspect basés sur l'approche « lumière ». Ce logiciel rapide et simple d'utilisation a pour vocation d'être déployé dans une expérimentation industrielle. Il fera également l'objet d'une diffusion plus large sous une licence d'exploitation qui reste encore à définir, car les méthodes implémentées peuvent apporter des solutions à la caractérisation de l'aspect de surface pour de nombreuses applications.
- ☞ **Amélioration de la robustesse du calcul de similarité d'aspect** Le résumé de l'apparence de la surface par les amplitudes modales invariantes à la rotation permet de discriminer les aspects de surface en tenant compte uniquement de la forme décrite par la répartition angulaire de la luminance réfléchie à la surface de l'échantillon. La connaissance extraite de la base modale par ce biais peut être enrichie en utilisant des attributs supplémentaires tels que la couleur (analyse multi-spectrale) et les invariants de courbures (micro-géométrie). La mise en compétition de ces sources d'informations variées pourrait faciliter la quantification des signatures pour le succès de la mesure de similarité. Une possibilité consiste à concaténer les différentes signatures, et à utiliser la distance de Mahalanobis qui permet comme nous l'avons vu dans la section 4.4.1 d'adapter la fonction de similarité à la différence d'échelle, autrement dit de se ramener à une échelle de valeurs commune aux différents attributs.
- ☞ **Inspection et caractérisation des matériaux translucides ou transparents au moyen de la *Sphère MeSurA*** La BRDF caractérise la réflexion des surfaces c'est-à-dire le comportement des surfaces qui réfléchissent la lumière incidente et absorbent ou transmettent le reste. Elle est donc définie sur l'hémisphère supérieure  $\mathcal{H}^{2+}$  adjacente à la surface. Néanmoins en définissant de la même manière une fonction de la transmittance bi-directionnelle (BTDF) [Nicodemus 77], il est possible de caractériser l'aspect des matériaux transparents en réflexion et en transmittance. La BTDF est définie sur l'hémisphère inférieur  $\mathcal{H}^{2-}$  à la surface. Les deux fonctions peuvent être regroupées et n'en former qu'une seule définie sur la sphère  $S^2$  entourant la surface. Des premiers essais ont été réalisés sur la Sphère MeSurA en réalisant des prises de vue d'un verre de lunette avec la caméra du dessus en transmittance. Cela revient à allumer une à une les sources d'éclairages appartenant non pas au dôme supérieur, mais au dôme inférieur. L'approximation RTI par l'approche modale est ensuite exécutée sur le lot d'images issues de cette acquisition. Cette exploration permet de mettre en évidence des anomalies d'aspect présentes sur les faces supérieures et inférieures du verre et également les imperfections à l'intérieur du verre, ce que le phénomène de réflexion optique ne permet pas d'observer de manière aussi performante.
- ☞ **La voie multispectrale** Nos travaux se sont focalisés uniquement sur la répartition spatiale de la luminance. Cette approche est donc incomplète en terme spectral du fait que nous nous soyons placés dans des conditions d'éclairage "naturelles" pour inspecter la surface dans un environnement lumineux similaire à celui des contrôleurs humains (section 1.3.3). Des travaux dans les domaines du patrimoine culturel et naturel notamment ont montré que la mesure multi-spectrale [Simon Chane 13, Mansouri 08] permettait d'enrichir les connaissances acquises sur l'apparence de la surface, d'accéder à des détails non visibles à l'œil nu ou encore de répondre aux exigences d'applications en colorimétrie où des développements peuvent être envisagés. Cependant, des nouvelles méthodes de visualisation et d'interaction doivent être développées afin que les spécialistes puissent interagir intuitivement avec

les modèles associés aux différentes modalités de la surface inspectée (multi-spectrale, pentes et courbures, 3D, etc).

### ☞ **Enrichir les mesures de topographie conventionnelles par les données issues de l'approche stéréophotométrique**

#### — *Première approche envisagée*

Il est possible d'intégrer le champ de normales estimé par l'approche stéréophotométrique afin d'obtenir l'information en altitudes (figure 1.23). Cependant la topographie obtenue ne peut pas être utilisée pour la métrologie au sens dimensionnel car de nombreuses hypothèses sur la réflectance du matériau et les éclairages ne sont pas prises en compte, induisant un certain nombre d'erreurs à la reconstruction des composantes de basse fréquence de la surface. On obtient de fait une surface en 3D qui est continue mais déformée. La correction des différentes sources de biais à la fois dans la modélisation du problème et dans sa résolution mathématique nécessite des contraintes supplémentaires qui peuvent rendre l'algorithme très coûteux en temps de calcul. On conseillera au lecteur de consulter la thèse de Yvain Queau pour approfondir ces aspects de la reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie [Queau 15]. Une propriété intéressante des méthodes d'intégration est leur capacité à pouvoir prendre en compte une connaissance a priori sur la surface à reconstruire, ce qui rend possible la fusion des données stéréophotométriques avec des données géométriques obtenues par d'autres techniques de reconstruction 3D [Frankot 88, MacDonald 15, Zollhöfer 15]. Ces approches sont prometteuses car elles permettent de reconstruire un 3D qui intègre les composantes HF de la mesure stéréophotométrique modulée par la composante BF extraite de l'autre mesure topographique. Cette perspective permet d'envisager une utilisation nouvelle à la mise en œuvre de la technique RTI sur le microscope confocal Alicona présenté dans la section 5.3.1.

#### — *Seconde approche*

L'autre approche possible est de venir projeter l'image du rendu de la surface issue de l'approximation RTI (image de la surface éclairée selon la direction d'éclairage choisie par l'utilisateur) directement sur le 3D de la pièce obtenue par une technique de reconstruction 3D, pour donner la perception à l'écran d'un objet 3D en rendu photoréaliste. Cette technique est déjà largement utilisée en infographie, dans les logiciels spécifiques de C.A.O par exemple.

- ☞ **Fusion des données issues des différents points de vue de la *Sphère MeSurA*** Actuellement, les lots d'images issus de l'acquisition des différentes caméras sont traités séparément pour l'obtention du rendu RTI et des autres cartographies ce qui nécessitent de basculer entre plusieurs instances du logiciel *MsaTool*® afin de visualiser les différents angles de face de l'objet inspecté. Plusieurs approches sont possibles pour faire la synthétisation des données, et progresser ainsi dans l'exploration des surfaces de l'objet tridimensionnel. Un exemple succinct de navigation entre des représentations RTI d'un objet vu sous des angles proches est donné dans [Mudge 06] en reconstruisant la scène complète à la manière des techniques en traitement d'images pour la construction de diaporama. Une seconde approche est d'avoir recours aux techniques de stéréovision pour la reconstruction de la scène 3D.



## Bibliographie

- [Adragna 06] P A Adragna, S Samper, M Pillet et H Favreliere. Analysis of shape deviations of measured geometries with a modal basis. *Journal of Machine Engineering*, 2006.
- [Aganj 10] Iman Aganj, Christophe Lenglet et Guillermo Sapiro. *ODF Maxima Extraction in Spherical Harmonic Representation via Analytical Search Space Reduction*. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2010*, pages 84–91. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, September 2010.
- [Aluze 98] D Aluze. *Système de detection et de caractérisation de défauts d’aspects sur des surfaces parfaitement speculars et non planes : Application au contrôle qualité de produits destinés à l’emballage cosmétique*. Thèse de Doctorat, Dijon, 1998.
- [Amet 98] A L Amet, A Ertuzun et A Ercil. Subband domain co-occurrence matrices for texture defect detection. submitted to *Image and Vision Computing. Journal*, 1998.
- [Andersson 09] A Andersson. *Evaluation and visualisation of surface defects on auto-body panels*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009.
- [Arai 13] Zin Arai. *A rigorous numerical algorithm for computing the linking number of links*. *Nonlinear Theory and Its Applications*, IEICE, 2013.
- [Baldi 10] Pierre Baldi et Laurent Itti. *Of bits and wows : A Bayesian theory of surprise with applications to attention*. *Neural Networks*, June 2010.
- [Balin 07] S Balin et V Giard. *La qualité des services et leurs processus de production*. Actes du 7e Congrès international de génie industriel, Trois-Rivières, Québec (Canada), 2007.
- [Baudet 11] N Baudet, M Pillet et J L Maire. *Visual inspection of products : a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies*. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2011.
- [Baudet 12] Nathalie Baudet. *Maîtrise de la qualité visuelle des produits - Formalisation du processus d’expertise et proposition d’une approche robuste de contrôle visuel humain*. December 2012.
- [Baudet 13] N Baudet, J L Maire et M Pillet. *The visual inspection of product surfaces*. *Food Quality and Preference*, 2013.
- [Beckmann 87] Petr Beckmann et André Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Artech House on Demand, 1987.

- 
- [Béland 00] Marie-Claude Béland et Jean M Bennett. *Effect of local microroughness on the gloss uniformity of printed paper surfaces*. Applied Optics, 2000.
- [Berthier 10] Serge Berthier. Photonique des Morphos. Springer Science & Business Media, Paris, September 2010.
- [Blinn 77] James F Blinn et James F Blinn. *Models of light reflection for computer synthesized pictures*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1977.
- [Bonnet 86] Claude Bonnet. Manuel pratique de psychophysique. Armand Colin, 1986.
- [Bosch 04] Carles Bosch, Xavier Pueyo, Stéphane Mérillou et Djamchid Ghazanfarpour. *A Physically-Based Model for Rendering Realistic Scratches*. Computer Graphics Forum, 2004.
- [Boukouvalas 98] C Boukouvalas, F De Natale, G De Toni, J Kittler, R Marik, M Mirmehdi, M Petrou, P Le Roy, R Salgari et G Vernazza. *ASSIST : automatic system for surface inspection and sorting of tiles*. Journal of Materials Processing Technology, 1998.
- [Briones 06] V Briones, J M Aguilera et C A Brown. *Effect of surface topography on color and gloss of chocolate samples*. Journal of food engineering, 2006.
- [Brown 94] C A Brown, W A Johnsen et P D Charles. *Method of quantifying the topographic structure of a surface*. United States Patent, 1994.
- [Brown 96] C A Brown, W A Johnsen et R M Butland. *Scale-Sensitive Fractal Analysis of Turned Surfaces*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996.
- [Burt 83] Peter J Burt et Edward H Adelson. *The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code*. Communications, IEEE Transactions on, 1983.
- [Caine 11] M Caine et M Magen. *Pixels and Parchment : The Application of RTI and Infrared Imaging to the Dead Sea Scrolls*. EVA London, 2011.
- [Charpentier 03] P Charpentier et D Choffel. *The feasibility of intrinsic signature identification for the traceability of pieces of wood*. Forest Products Journal, 2003.
- [Charton 14] Jerome Charton. *Etude de caractéristiques saillantes sur des maillages 3D par estimation des normales et des courbures discrètes*. December 2014.
- [CIE 04] CIE. *Photometry—the CIE system of physical photometry*. Standard observer CIE/ISO standard CIE S, 2004.
- [CIE 07] CIE. *CIE 127 :2007 Measurement of leds*. Technical Report, 2007.
- [Clarke 09] Alasdair D F Clarke, Mike J Chantler et Patrick R Green. *Modeling visual search on a rough surface*. Journal of Vision, 2009.
- [Clarke 10] ADF Clarke. *Modelling visual search for surface defects*. Thèse de Doctorat, Edinburgh, 2010.
- [Cohen 91] F S Cohen, Z Fan et M A Patel. *Classification of rotated and scaled textured images using Gaussian Markov random field models*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991.
- [Cook 82] R L Cook et K E Torrance. *A Reflectance Model for Computer Graphics*. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1982.
- [Costa 07] M Dalla Costa, M Bigerelle et D Najjar. *A new methodology for quantifying the multi-scale similarity of images*. Microelectronic engineering, 2007.
-



- 
- [Dana 99] K J Dana, B van Ginneken, S K Nayar et J J Koenderink. *Reflectance and Texture of Real-World Surfaces*. ACM Transactions on Graphics, 1999.
- [Danzl 09] R Danzl, F Helmlí et S Scherer. *Focus variation—a new technology for high resolution optical 3D surface metrology*. The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, 2009.
- [Deboor 05] Conte Deboor. *Elementary Numerical Analysis*, 3/E. Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- [Debrosse 10] T Debrosse, M Pillet, J L Maire et N Baudet. *Sensory perception of surfaces quality*. Proceedings of KEER 2010 - International conference on Kansei engineering and emotion research , Paris, France, 2010.
- [Delcroix 00] Gaetan Delcroix. *Etude et réalisation d'un dispositif de contrôle d'aspect temps réel par vision artificielle de pièces métallisées en défilement*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2000.
- [Desage 14] SF Desage, G Pitard, M Pillet, H Favreliere, F Frelín, S Samper, G Le Goïc, L Gwinner et P Jochum. *Visual Quality Inspection and Fine Anomalies : Methods and Application*. In Precision Assembly Technologies and Systems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, February 2014.
- [Desage 15a] SF Desage. *Contraintes et opportunités pour l'automatisation de l'inspection visuelle au regard du processus humain*. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, November 2015.
- [Desage 15b] SF Desage, G Pitard, M Pillet, H Favreliere, Jean Luc Maire, F Frelín, S Samper et G Le Goïc. *Syntactic texture and perception for a new generic visual anomalies classification*. The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015, 2015.
- [Drbohlav 05] O Drbohlav et M Chantler. *Illumination-invariant texture classification using single training images*. Texture, 2005.
- [Drew 12] Mark S Drew, Yacov Hel-Or, Tom Malzbender et Nasim Hajari. *Robust estimation of surface properties and interpolation of shadow/specularity components*. Image and Vision Computing, May 2012.
- [Duffy 13] S B Duffy. P., *Multi-Light Imaging Techniques for Heritage Application*. English Heritage, 2013.
- [Durou 07] J D Durou. *Shape from shading - Eclairages, réflexions et perspectives*. Rapport d'Habilitation à Diriger des Recherches, 2007.
- [Durou 12] Jean-Denis Durou, Yvain Queau et Vincent Charvillat. *Résolution de la stéréophotométrie par apprentissage*. 2012.
- [Earl 10] G Earl et K Martinez. *Archaeological applications of polynomial texture mapping : analysis, conservation and representation*. Journal of Archaeological Science, 2010.
- [Elias 05] M Elias. *La couleur, analyse et caractérisation*. In MESURExpo 2005, Paris, France, 2005.
- [Eterradosi 11] Olivier Eterradosi. *Une approche cartographique des propriétés d'aspect des matériaux*. Rapport d'Habilitation à Diriger des Recherches, December 2011.
- [Favreliere 09] H Favreliere. *Modal Tolerancing : From metrology to specifications*. Thèse de Doctorat, Annecy, 2009.
-

- 
- [Frankot 88] R T Frankot et R Chellappa. *A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1988.
- [Fuatealba 06] Cecilia Fuatealba, Denise Choffel et P Charpentier. *Non destructive Control tool for wood traceability*. pages CD–Rom, December 2006.
- [Furferi 13] R Furferi, L Governi et Y Volpe. *Image processing-based method for glass tiles colour matching*. The Imaging Science Journal, 2013.
- [Gauss 27] K F Gauss. *General Investigations of curved surfaces of 1827 and 1825*. Presented to the Royal Society of Göttingen, 1827.
- [Gautron 04] P Gautron, J Krivanek, S N Pattanaik et K Bouatouch. *A Novel Hemispherical Basis for Accurate and Efficient Rendering*. Eurographics Symposium on Rendering 2004, 2004.
- [Ged 10] G Ged, G Obein, Z Silvestri, J Le Rohellec et F Vienot. *Recognizing real materials from their glossy appearance*. Journal of Vision, 2010.
- [Georghiades 03] Athinodoros S Georghiades. Incorporating the Torrance and Sparrow model of reflectance in uncalibrated photometric stereo. IEEE, 2003.
- [Gotlieb 94] J B Gotlieb, D Grewal et S W Brown. *Consumer satisfaction and perceived quality : Complementary or divergent constructs ?* Journal of Applied Psychology, 1994.
- [Grandjean 12] J Grandjean, Gaetan Le Goic, H Favreliere, Y Ledoux, S Samper, F Formosa, L Devun et T Gradel. *Multi-scalar analysis of hip implant components using modal decomposition*. Measurement Science and Technology, 2012.
- [Gruna 11] Robin Gruna et Jürgen Beyerer. *Acquisition and evaluation of illumination series for unsupervised defect detection*. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011.
- [Gruna 12] R Gruna et S Irgenfried. Reflectance modeling in machine vision : Applications in image analysis and synthesis, 2012.
- [Guerra 09] A S Guerra. *Métrie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel*. Thèse de Doctorat, Annecy, 2009.
- [Haddad 97] A Haddad. *Détection et analyse automatique des défauts de surface sur produits plats en acier*. Rapport technique, 1997.
- [Haralick 93] Robert M Haralick et Linda G Shapiro. Computer and Robot Vision. Prentice Hall, 1993.
- [He 91] X D He, K E Torrance, F X Sillion et D P Greenberg. *A comprehensive physical model for light reflection*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1991.
- [Hildebrand 87] Francis Begnaud Hildebrand. Introduction to Numerical Analysis. Courier Corporation, 1987.
- [Horn 81] Berthold K P Horn. *Hill shading and the reflectance map*. Proceedings of the IEEE, 1981.
- [Horn 86] B K P Horn et M J Brooks. *The Variational Approach to Shape From Shading*. Computer Vision Graphics and Image Processing, 1986.
- [Horn 90] B K P Horn. *Height and gradient from shading*. International Journal of Computer Vision, 1990.
-

- 
- [ISO-25178-2 12] ISO-25178-2. *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 2 : Terms, definitions and surface texture parameters*, 2012.
- [ISO-25178-6 10] ISO-25178-6. *Surface texture : Areal - Part 6 : Classification of methods for measuring surface texture*. 2010.
- [ISO-9000 01] ISO-9000. *Quality systems handbook*. 2001.
- [Itti 98] L Itti, C Koch et E Niebur. *A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998.
- [Itti 00] Laurent Itti et Christof Koch. *A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention*. Vision research, 2000.
- [Itti 04] Laurent Itti, Nitin Dhavale et Frederic Pighin. *Realistic avatar eye and head animation using a neurobiological model of visual attention*. Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting, vol. 5200, pages 64–78, January 2004.
- [Itti 05] L Itti et P F Baldi. *Bayesian surprise attracts human attention*. Neural Information Processing Systems, 2005.
- [Itti 09] Laurent Itti et Pierre Baldi. *Bayesian surprise attracts human attention*. Vision research, 2009.
- [Jiang 07] X Jiang, P Scott et D Whitehouse. *Freeform Surface Characterisation - A Fresh Strategy*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 56, no. 1, pages 553–556, 2007.
- [Johnson 09] Micah K Johnson et E H Adelson. *Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape*. 2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPR Workshops), 2009.
- [Jourlin 95] Michel Jurlin et Jean-Charles Pinoli. *Image dynamic range enhancement and stabilization in the context of the logarithmic image processing model*. Signal Processing, vol. 41, no. 2, pages 225–237, January 1995.
- [Kautz 02] J Kautz, P P Sloan et J Snyder. *Fast, arbitrary BRDF shading for low-frequency lighting using spherical harmonics*. In Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, 2002.
- [Kazhdan 03] M Kazhdan et T Funkhouser. *Rotation invariant spherical harmonic representation of 3d shape descriptors*. Symposium on geometry, 2003.
- [Koenderink 84] Jan J Koenderink. *The structure of images*. Biological cybernetics, vol. 50, no. 5, pages 363–370, 1984.
- [Koenderink 92] J J Koenderink et A J van Doorn. *Surface shape and curvature scales*. Image and Vision Computing, 1992.
- [Koenderink 96a] J J Koenderink, A J van Doorn et M Stavridi. *Bidirectional Reflection Distribution Function expressed in terms of surface scattering modes*. Computer Vision—ECCV'94, 1996.
- [Koenderink 96b] Jan J Koenderink, Andrea J van Doorn et Marigo Stavridi. *Bidirectional reflection distribution function expressed in terms of surface scattering modes*. In Computer Vision — ECCV '96. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [Koenderink 03] J J Koenderink et A J van Doorn. *Local structure of gaussian texture*. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Special Issue on Multiresolution Analysis, 2003.
-

- 
- [Kotani 99] Kazunori Kotani, Ryuuya Tachino, Ikuo Terado et Yukiko Kenmochi. Reflection and transparency model of rose petals for computer graphics based on the micro-scopic scale structures, volume 3. IEEE, 1999.
- [Krivanek 10] J Krivanek, J A Ferwerda et K Bala. *Effects of global illumination approximations on material appearance*. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010.
- [Lafortune 97] E P F Lafortune, S-C Foo, K E Torrance et D P Greenberg. *Non-Linear Approximation of Reflectance Functions*. Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1997.
- [Le Breton 15] Ronan Le Breton, Guillaume Ged et Gaël Obein. *Out of plane BRDF measurement at LNE-CNAM using Condor, our primary goniospectrophotometer*. In Proceedings of the th Session of the CIE, Manchester, 2015.
- [Le Goïc 11] G Le Goïc, H Favreliere, S Samper et F Formosa. *Multi scale modal decomposition of primary form, waviness and roughness of surfaces*. Scanning, the journal of scanning microscopies - Special Issue on Surface Metrology II, vol. 33, no. 5, pages 332–341, 2011.
- [Le Goïc 12] G Le Goïc. *Qualité géométrique & Aspect des surfaces*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, Annecy, October 2012.
- [Le Goïc 13] G Le Goïc, C A Brown, H Favreliere, S Samper et F Formosa. *Outlier filtering : a new method for improving the quality of surface measurements*. Measurement Science and Technology, vol. 24, no. 1, page 015001, January 2013.
- [Le Goïc 16] Gaëtan Le Goïc, Maxence Bigerelle, S Samper, H Favreliere et M Pillet. *Multiscale roughness analysis of engineering surfaces : A comparison of methods for the investigation of functional correlations*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016.
- [Le Moan 13] Steven Le Moan, Anass Mansouri, Jon Yngve Hardeberg et Yvon Voisin. *Saliency for Spectral Image Analysis*. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, 2013.
- [Le Port 09] A Le Port, S Thuillier et P-Y Manach. *Occurrence and numerical prediction of surface defects during flanging of metallic sheets*. International Journal of Material Forming, 2009.
- [Le Port 11] A Le Port, S Thuillier et P-Y Manach. *Characterization of surface defects after flanging of metallic sheets*. Journal of Materials Processing Tech., 2011.
- [Legay 05] F Legay, G Monteil, C Roques-Carmes et V Zwilling. *Local Defects Characterization*. Proceedings of the 10th International Conference of Engineering Surfaces, 2005.
- [Leung 01] Thomas Leung et Jitendra Malik. *Representing and Recognizing the Visual Appearance of Materials using Three-dimensional Textons*. International Journal of Computer Vision, 2001.
- [Lilien 15] R Lilien. *Applied Research and Development of a Three- Dimensional Topography System for Firearm Identification using GelSight*. 2015.
- [Lorenzetto 98] Gian Paolo Lorenzetto. *Image Comparison Metrics : A Review*. Rapport technique, 1998.
-

- 
- [MacDonald 11] L W MacDonald. *Visualising an Egyptian Artefact in 3D : Comparing RTI with Laser Scanning*. Proceedings of the 2011 international conference on Electronic Visualisation and the Arts EVA'11, 2011.
- [MacDonald 15] Lindsay W MacDonald. *Surface reconstruction from photometric normals with reference height measurements*. SPIE Optical Metrology, 2015.
- [Mahalanobis 36] P C Mahalanobis. *On the generalized distance in statistics*. Proceedings of the National Institute of Sciences (Calcutta), 1936.
- [Mak 08] L Mak, S Grandison et R J Morris. *An extension of spherical harmonics to region-based rotationally invariant descriptors for molecular shape description and comparison*. Journal of Molecular Graphics and Modelling, vol. 26, no. 7, pages 1035–1045, 2008.
- [Malzbender 00] T Malzbender et D G Gelb. *Apparatus for and method of enhancing shape perception with parametric texture maps*. US Patent Office, 2000.
- [Malzbender 01a] T Malzbender. *Direction-dependent texture maps in a graphics system*. US Patent Office, 2001.
- [Malzbender 01b] T Malzbender et D Gelb. *Polynomial Texture Map (.ptm) File Format*. Rapport technique, Hewlett-Packard, 2001.
- [Malzbender 01c] T Malzbender, D Gelb et H Wolters. *Polynomial texture maps*. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001.
- [Malzbender 05] T Malzbender et D G Gelb. *Apparatus for and method of rendering 3D objects with parametric texture maps*. US Patent Office, October 2005.
- [Mansouri 08] Alamin Mansouri, Tadeusz Sliwa, Jon Y Hardeberg et Yvon Voisin. *Representation and estimation of spectral reflectances using projection on PCA and wavelet bases*. Color Research & Application, vol. 33, no. 6, pages 485–493, December 2008.
- [Mao 92] Jianchang Mao et Anil K Jain. *Texture classification and segmentation using multi-resolution simultaneous autoregressive models*. Pattern recognition, 1992.
- [Mehlum 98] E Mehlum et C Tarrou. *Invariant smoothness measures for surfaces*. Advances in Computational Mathematics, 1998.
- [Mérillou 01] S Mérillou, J M Dischler et D Ghazanfarpour. *Surface scratches : measuring, modeling and rendering*. The Visual Computer, 2001.
- [Mudge 06] M Mudge, T Malzbender, C Schroer et M Lum. *New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display*. VAST, 2006.
- [Mudge 08] M Mudge, T Malzbender, A Chalmers et R Scopigno. *Image-based empirical information acquisition, scientific reliability, and long-term digital preservation for the natural sciences and cultural heritage*. In Eurographics, Crete, 2008.
- [Murray-Coleman 90] J F Murray-Coleman et A M Smith. *The automated measurement of BRDFs and their application to luminaire modeling*. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1990.
- [Nayar 90] Shree K Nayar et Yasuo Nakagawa. *Shape from focus : an effective approach for rough surfaces*. IEEE, 1990.
- [Nayar 92] Shree K Nayar. *Shape from focus system*. 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 302–308, 1992.
-

- 
- [Nayar 94] Shree K Nayar et Yasuo Nakagawa. *Shape from focus*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 16, no. 8, pages 824–831, August 1994.
- [Newman 15] Sarah E Newman. *Applications of Reflectance Transformation Imaging (RTI) to the study of bone surface modifications*. Journal of Archaeological Science, vol. 53, pages 536–549, January 2015.
- [Nicodemus 65] F E Nicodemus. *Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface*. Applied Optics, vol. 4, pages 1–8, 1965.
- [Nicodemus 77] F E Nicodemus, J C Richmond, J J Hsia, I W Ginsberg et T Limperis. Geometrical considerations and nomenclature for Reflectance. Institute for Basic Standards, National Bureau of Standards, Washington, 1977.
- [Niederöst 03] Markus Niederöst, Jana Niederöst et Jiří Ščučka. Automatic 3D Reconstruction and Visualization of Microscopic Objects from a Monoscopic Multifocus Image Sequence. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2003.
- [November 12] E K November. *Infrared RTI : Experimentation towards the development of multispectral RTI*. Archaeological Computing Research Group, November 2012.
- [Obein 03] Gaël Obein. Caractérisation optique et visuelle du brillant, 2003.
- [Obein 14] Gaël Obein, Shiraz Ouarets et Guillaume Ged. *Evaluation of the shape of the specular peak for high glossy surfaces*. IS&T/SPIE Electronic Imaging, vol. 9018, pages 901805–901805–11, February 2014.
- [Oren 94] M Oren et S K Nayar. *Generalization of Lambert’s reflectance model*. Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 239–246, 1994.
- [Otsu 75] N Otsu. *A threshold selection method from gray-level histograms*. Automatica, 1975.
- [Palma 10] G Palma, M Corsini et P Cignoni. *Dynamic shading enhancement for reflectance transformation imaging*. Journal on Computing and Cultural Heritage, vol. 3, 2010.
- [Parmar 11] Rohit R Parmar, Kavindra R Jain et Chintan K Modi. *Unified Approach in Food Quality Evaluation Using Machine Vision*. In Advances in Computing and Communications, pages 239–248. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Pastorius 90] W J Pastorius. *D Sight as a Surface Quality Process Control System : An Update of Implementation Experience*. 45th Annual Conference, 1990.
- [Pitard 13] G Pitard, G Le Goic, S Desage, S Samper, H Favreliere et M Pillet. *Mesurer l’aspect des surfaces : dispositif et méthodes*. Journée Thématique du Pôle O.R.A Fonctionnalisation de surfaces et caractérisation, 2013.
- [Pitard 14a] G Pitard, G Le Goic, S Desage, H Favreliere, S Samper et M Pillet. *Comment mesurer l’aspect d’une surface ?*. Journée thématique sur la maîtrise de la qualité fonctionnelle des surfaces MQFS, 2014.
- [Pitard 14b] G Pitard, G Le Goic, S Desage, S Samper, H Favreliere et M Pillet. *Inspection visuelle des surfaces et courbures*. Journée Mesure Dimensionnelle par Vision, GdR ISIS, 2014.
- [Pitard 14c] G Pitard, G Le Goic, H Favreliere, S Desage, S Samper et M Pillet. *Surface quality inspection from curvature features*. 4th International Conference on Surface Metrology (ICSM), 2014.
-



- [Pitard 15] G Pitard, G Le Goïc, H Favreliere, S Samper, SF Desage et M Pillet. *Discrete Modal Decomposition for surface appearance modelling and rendering*. SPIE Optical Metrology, vol. 9525, pages 952523–952523–10, June 2015.
- [Porter 97] R Porter et N Canagarajah. *Robust rotation-invariant texture classification : wavelet, Gabor filter and GMRF based schemes*. Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings -, vol. 144, no. 3, pages 180–188, June 1997.
- [Pottier 13] T Pottier, H Louche, S Samper, H Favreliere, F Toussaint et P Vacher. *A new filtering approach dedicated to heat sources computation from thermal field measurements*. PhotoMechanics Conference, pages 1–4, 2013.
- [Pottier 14] Thomas Pottier, Hervé Louche, S Samper, H Favreliere, Franck Toussaint et Pierre Vacher. *Proposition of a modal filtering method to enhance heat source computation within heterogeneous thermomechanical problems*. International Journal of Engineering Science, vol. 81, pages 163–176, August 2014.
- [Proença 09] Alberto José Proença. *RTI-based techniques and tools for digital surrogates*. Thèse de Doctorat, October 2009.
- [Puntous 13a] T Puntous, S Pavan, D Delafosse, M Jourlin et J Rech. *Ability of quality controllers to detect standard scratches on polished surfaces*. Precision Engineering, vol. 37, no. 4, pages 924–928, October 2013.
- [Puntous 13b] Théodore Puntous. *Perception et détection automatique des rayures de polissage*. Thèse de Doctorat, 2013.
- [Qi 12] Lin Qi. *Measuring Perceived Gloss of Rough Surfaces*, 2012.
- [Qi 15] Lin Qi, Mike J Chantler, J Paul Siebert et Junyu Dong. *The joint effect of mesoscale and microscale roughness on perceived gloss*. Vision research, vol. 115, pages 209–217, October 2015.
- [Queau 15] Yvain Queau. *Reconstruction tridimensionnelle par stéréophotométrie*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, November 2015.
- [Raj 11] Alvin Raj, Edward H Adelson, Micah K Johnson et Forrester Cole. *Microgeometry capture using an elastomeric sensor*. ACM, July 2011.
- [Ridel 13] Brett Ridel, Patrick Reuter, Jeremy Laviole, Nicolas Mellado, Xavier Granier et Nadine Couture. *La Lampe torche magique : Une interface tangible pour l’inspection géométrique d’objets en réalité augmentée spatiale. Une interface tangible pour l’inspection géométrique d’objets en réalité augmentée spatiale*. ACM, New York, New York, USA, November 2013.
- [Ridel 14] Brett Ridel, Patrick Reuter, Jeremy Laviole, Nicolas Mellado, Nadine Couture et Xavier Granier. *The Revealing Flashlight : Interactive Spatial Augmented Reality for Detail Exploration of Cultural Heritage Artifacts*. Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), vol. 7, no. 2, pages 6–18, July 2014.
- [Roberts 01] A Roberts. *Curvature attributes and their application to 3 D interpreted horizons*. First break, 2001.
- [Rose 09] P Rose, Y Surrel et J M Becker. *Specific design requirements for a reliable slope and curvature measurement standard*. Measurement Science and Technology, vol. 20, no. 9, page 095110, 2009.

- 
- [Rugis 06] John Rugis et Reinhard Klette. *Surface Registration Markers from Range Scan Data*. In Combinatorial Image Analysis, pages 430–444. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, June 2006.
- [Rugis 08] John Rugis. *Digital surface curvature*. Thèse de Doctorat, ResearchSpace@Auckland, 2008.
- [Samper 09] S Samper, P A Adragna et H Favreliere. *Modeling of 2d and 3d assemblies taking into account form errors of plane surfaces*. Journal of Computing and Information Science in Engineering, vol. 9, no. 4, 2009.
- [Schröder 95] Peter Schröder et Wim Sweldens. *Spherical Wavelets : Texture Processing*. In Rendering Techniques '95, pages 252–263. Springer Vienna, Vienna, 1995.
- [Sharan 08] Lavanya Sharan, Yuanzhen Li, Isamu Motoyoshi, Shin'ya Nishida et Edward H Adelson. *Image statistics for surface reflectance perception*. JOSA A, vol. 25, no. 4, pages 846–865, April 2008.
- [Simon Chane 13] Camille Simon Chane, Alamin Mansouri, Franck S Marzani et Frank Boochs. *Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications : Survey and perspectives*. Image and Vision Computing, vol. 31, no. 1, pages 91–102, January 2013.
- [Simonot 02] L Simonot et M Elias. *Color change due to surface state modification*. Color Research & Application, vol. 28, no. 1, pages 45–49, 2002.
- [Smith 99a] M L Smith. *The analysis of surface texture using photometric stereo acquisition and gradient space domain mapping*. Image and Vision Computing, vol. 17, no. 14, pages 1009–1019, November 1999.
- [Smith 99b] M L Smith, G Smith et T Hill. *Gradient space analysis of surface defects using a photometric stereo derived bump map*. Image and Vision Computing, vol. 17, no. 3-4, pages 321–332, March 1999.
- [Sun 06] Z Sun et Y Yang. *A study of surface deflection in pressed automobile panels*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 180, no. 1-3, pages 53–59, 2006.
- [Surrel 99] Y Surrel, N Fournier, M Grédiac et P A Paris. *Phase-stepped deflectometry applied to shape measurement of bent plates*. Experimental mechanics, vol. 39, no. 1, pages 66–70, 1999.
- [Surrel 12] Y Surrel. *Mesure de la qualité de surface par déflectométrie*. Présentation du système ONDULO, Société Visuol technologies, pages 1–38, 2012.
- [Van Oosterom 83] A Van Oosterom et J Strackee. *The Solid Angle of a Plane Triangle*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 2, no. BME-30, pages 125–126, 1983.
- [Van Vliet 93] L J Van Vliet. *Curvature and bending energy in digitized 2D and 3D images*. Proceedings of the Scandinavian Conference on Image Analysis, vol. 2, pages 1403–1410, 1993.
- [Visuol 12] Visuol. *Etude d'une aile automobile en plastique injecté*. pages 1–4, 2012.
- [Walther 06] Dirk Walther et Christof Koch. *Modeling attention to salient proto-objects*. Neural Networks, vol. 19, no. 9, pages 1395–1407, November 2006.
- [Wang 04] Zhou Wang, Alan Conrad Bovik, Hamid Rahim Sheikh et Eero P Simoncelli. *Image quality assessment : from error visibility to structural similarity*. Image Processing, IEEE Transactions on, vol. 13, no. 4, pages 600–612, April 2004.
-

- [Wang 05] Z Wang, A C Bovik et E P Simoncelli. *Structural approaches to image quality assessment*. Handbook of Image and Video Processing, 2005.
- [Ward 92] Gregory J Ward et Gregory J Ward. *Measuring and modeling anisotropic reflection*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 26, no. 2, pages 265–272, July 1992.
- [Westin 92] S H Westin, J R Arvo et K E Torrance. *Predicting Reflectance Functions from Complex Surfaces*. Thèse de Doctorat, Faculty of the Graduate School of Cornell University, 1992.
- [Woodham 80] R J Woodham. *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*. Optical engineering, 1980.
- [Wu 03] Jiahua Wu et Mike J Chantler. Combining gradient and albedo data for rotation invariant classification of 3D surface texture. IEEE, 2003.
- [Zhang 14a] Mingjing Zhang. *Robust surface normal estimation via greedy sparse regression*. Thèse de Doctorat, January 2014.
- [Zhang 14b] Mingjing Zhang et Mark S Drew. *Efficient robust image interpolation and surface properties using polynomial texture mapping*. EURASIP Journal on Image and Video Processing, vol. 2014, no. 1, pages 1–19, 2014.
- [Zhang 15] Mingjing Zhang et Mark S Drew. *Robust surface normal estimation via greedy sparse regression*. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2015.
- [Zhao 10] H B Zhao. *Multisensor integration and discrete geometry processing for coordinate metrology*. Thèse de Doctorat, PhD thesis, ENS Cachan, 2010.
- [Zollhöfer 15] Michael Zollhöfer, Angela Dai, Matthias Innmann, Chenglei Wu, Marc Stamminger, Christian Theobalt et Matthias Nießner. *Shading-based refinement on volumetric signed distance functions*. ACM Transactions on Graphics (TOG), vol. 34, no. 4, pages 96–96 :14, July 2015.



*A*

**Annexes**

## A.1 Relations de récurrence pour calculer les polynômes associés de Legendre

Les polynômes associés de Legendre  $P_l^m$  peuvent être calculés en utilisant les relations de récurrence suivantes :

$$(l-m)P_l^m(x) = x(2l-1)P_{l-1}^m(x) - (l+m-1)P_{l-2}^m(x) \quad (\text{A.1})$$

$$P_m^m(x) = (-1)^m (2m-1)!! (1-x^2)^{m/2} \quad (\text{A.2})$$

$$P_{m+1}^m(x) = x(2m+1)P_m^m(x) \quad (\text{A.3})$$

où  $n!!$  est appelé la double factorielle de  $n$ , i.e. le produit de tous les entiers positifs inférieurs ou égaux à  $n$  avec la même parité que  $n$ .



## A.2 Espace des descripteurs de l'approche modale

La figure A.1 représente les 50 premiers modes de la base modale naturelle avec leur phase associée.

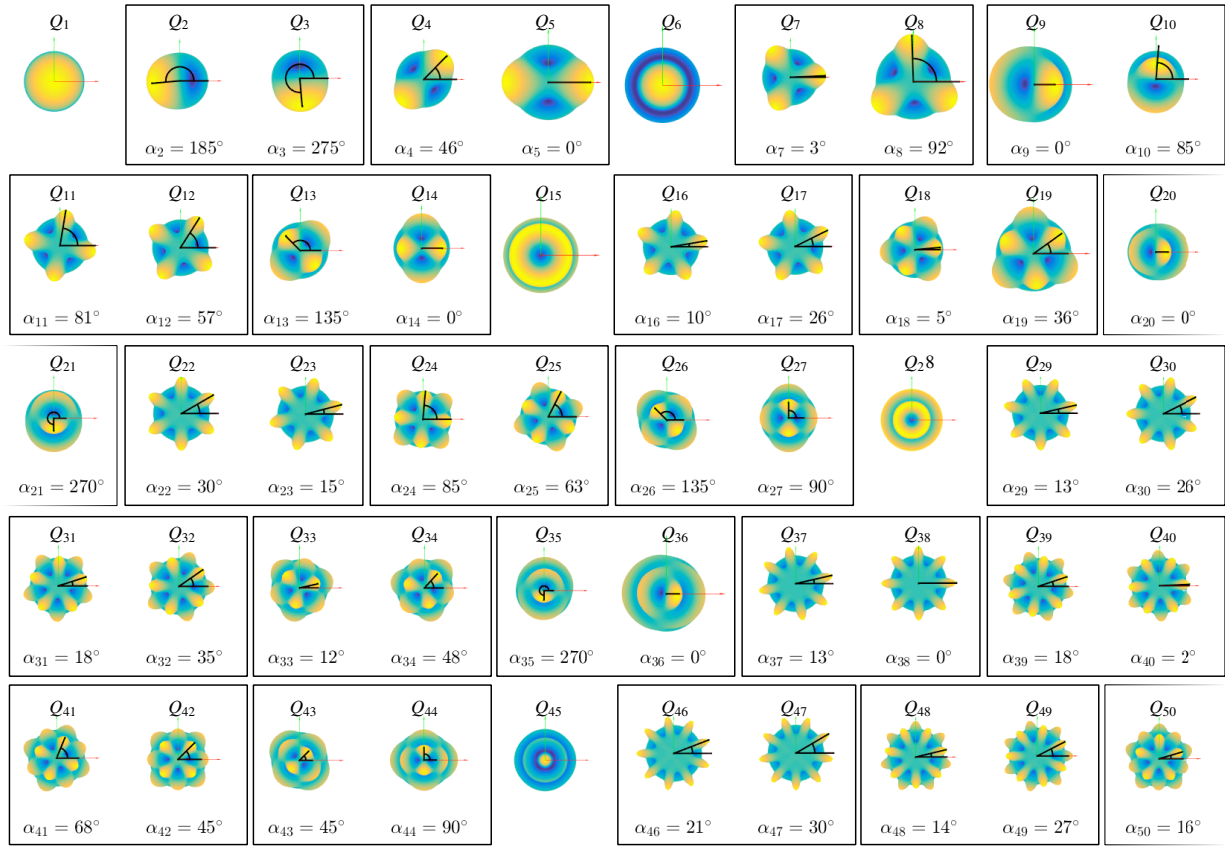


FIGURE A.1 – Base modale naturelle avec les regroupements des modes congruents



## Communications associées à ces travaux

### Communications orales et colloques à comité de lecture

#### CONFÉRENCES INTERNATIONALES

- 2015 Gilles PITARD, Gaëtan LE GOÏC, Simon DÉPAGE, Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Maurice PILLET. « Discrete Modal Decomposition for surface appearance modelling and rendering ». *SPIE Optical Metrology, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, Munich*, 2015.
- 2015 Simon DÉPAGE, Gilles PITARD, Maurice PILLET, Hugues FAVRELIÈRE, Jean-Luc MAIRE, Fabrice FRELIN, Serge SAMPER, Gaëtan LE GOÏC, Laurent GWINNER et Pierre JOCHUM. « Syntactic texture and perception for a new generic visual anomalies classification ». *Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Le Creusot*, 2015.
- 2015 Simon DÉPAGE, Gilles PITARD, Maurice PILLET, Hugues FAVRELIÈRE, Jean-Luc MAIRE, Fabrice FRELIN, Serge SAMPER, Gaëtan LE GOÏC, Laurent GWINNER et Pierre JOCHUM. « Extended visual appearance texture features ». *SPIE Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics, San Francisco*, 2015.
- 2014 Gilles PITARD, Gaëtan LE GOÏC, Simon DÉPAGE, Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Maurice PILLET. « Surface quality inspection from curvature features ». *4th International Conference on Surface Metrology, Hambourg*, 2014.
- 2014 Simon DÉPAGE, Gilles PITARD, Maurice PILLET, Hugues FAVRELIÈRE, Fabrice FRELIN, Serge SAMPER, Gaëtan LE GOÏC, Laurent GWINNER et Pierre JOCHUM. « Visual quality inspection and fine anomalies : methods and application ». *Precision assembly technologies and systems, IPAS Chamonix*, 2014.
- 2014 Simon DÉPAGE, Gilles PITARD, Hugues FAVRELIÈRE, Maurice PILLET, Olivier DELLEA, Pascal FUGIER, Philippe CORONEL, et Emmanuel OLLIER. « Macroscopic exploration and visual quality inspection of thin film deposit ». *SPIE Advanced Lithography, San José*, 2014.

CONFÉRENCES NATIONALES

- 2015 Simon DÉSAGE, Gilles PITARD, Maurice PILLET, Hugues FAVRELIÈRE, Jean-Luc MAIRE, Fabrice FRELIN, Serge SAMPER, Gaëtan LE GOÏC. « Vers une automatisation du contrôle visuel des produits ». *Qualita, Nancy*, 2015.
- 2014 Gilles PITARD, Gaëtan LE GOÏC, Simon DÉSAGE, Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Maurice PILLET. « Inspection visuelle des surfaces et courbures ». *Journée Mesure Dimensionnelle par Vision (GdR ISIS)*, 2014.
- 2014 Gilles PITARD, Gaëtan LE GOÏC, Simon DÉSAGE, Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Maurice PILLET. « Comment mesurer l'aspect d'une surface ? ». *Journée thématique sur la maîtrise de la qualité fonctionnelle des surfaces (MQFS)*, 2014.
- 2013 Gilles PITARD, Gaëtan LE GOÏC, Simon DÉSAGE, Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Maurice PILLET. « Mesurer l'aspect des surface : dispositifs et méthodes ». *Journée Thématique du Pôle ORA : Fonctionnalisation de Surfaces et Caractérisation*, 2013. (poster)



## Résumé

### *Métrologie et modélisation de l'aspect pour l'inspection qualité des surfaces*

Dans le secteur industriel, la maîtrise de l'aspect des surfaces est une problématique majeure de la conception jusqu'à la réalisation des produits. En entreprise, l'évaluation de la qualité des surfaces est souvent réalisée par des contrôleurs humains, sauf pour certaines applications spécifiques pour lesquels des systèmes instrumentés ont pu être mis en œuvre. L'objectif est donc d'aider les fabricants à mieux évaluer l'aspect et de progresser vers l'automatisation du processus d'inspection qualité des surfaces.

D'un point de vue métrologique, la quantification de l'aspect passe par l'acquisition de la fonction de répartition du coefficient de luminance (BRDF) qui fournit une cartographie de la lumière réfléchie à la surface d'un échantillon. Le système visuel humain extrait de cette mesure les facteurs influents à partir desquels il élabore des attributs de l'aspect : régularité d'une texture, uniformité de la couleur, qualité du brillant, saillance d'une anomalie, etc.

Notre approche consiste à utiliser les techniques appelées *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) originellement issues du domaine archéologique, pour l'industrie. Elles permettent d'obtenir simultanément une estimation réduite et simplifiée de la BRDF et une estimation des normales à la surface.

Un dispositif d'acquisition RTI appelé la *Sphère MeSurA* permet d'obtenir des données stéréophotométriques (luminances). L'approximation de forme des mesures discrètes de luminances acquises est réalisée selon le principe de la *Décomposition Modale Discrète* (DMD). Une analyse comparative avec les autres modèles montre que la DMD décrit plus fidèlement les réflexions spéculaires, et plus généralement les zones locales de surfaces brillantes.

Nous développons une méthode permettant de mesurer la similarité d'aspect en définissant des descripteurs invariants à la rotation obtenus par un changement de paramétrage de la DMD. Nous calculons ainsi des cartes de distance permettant d'extraire les anomalies les plus saillantes. Nous proposons également leur évaluation par des attributs pertinents sur lesquels les contrôleurs pourront se baser pour décider de la conformité d'un produit.

Nous mettons l'accent sur des indicateurs directionnels de normales et de courbures à la surface. Ils permettent de séparer efficacement les composantes périodiques et non-périodiques de la surface, et ainsi de caractériser géométriquement les anomalies d'aspect d'une part et d'autre part la signature d'un procédé de fabrication.

Les résultats de ces travaux permettent d'aider les fabricants à maîtriser la qualité d'aspect en accédant à différentes modalités de la surface inspectée, dans un logiciel d'application appelé *MsaTool*<sup>®</sup>.

**Mots clés :** Qualité des surfaces, BRDF, RTI, Paramétrage modal, Anomalies d'aspect, Saillance, Courbures

---

## Abstract

### *Surface appearance metrology and modelling for industrial quality inspection*

In industry, controlling the surface appearance is an important issue in the product creation, from the conception phases through the manufacturing phase all the way to delivery to the final consumer. The surface quality control is mostly carried out by human controllers, except for specific applications where inspection devices have been designed. Our prime purpose is to help manufacturers for the assessment of the surface finish appearance and move towards automation of the inspection process.

From a metrological point of view, the relevant quantity is the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) that describes the angular distribution of the reflected light from a surface. The human visual system is able to extract information about these surface reflectance properties, that allow us to construct a mental representation of the stimulus and give meaning to the observations : structural regularity, color uniformity, gloss quality, characteristics of salience, etc.

Our approach is based on the use of techniques known as *Reflectance Transformation Imaging* (RTI), initially developed to study the surface of cultural heritage artefacts, as industrial measurement instrument. The RTI techniques allow us to obtain both a reduced and simplified BRDF estimation and the normal field to the surface.

A RTI acquisition system called *MeSurA Sphere* provides photometric stereo datasets (radiance values captured under varying illumination). The continuous model of the local reflection of radiances is based on the *Discrete Modal Decomposition* (DMD). A comparative analysis with other RTI models shows that the DMD is well suited for approximating the complex physical behavior of light reflections and enhance the overall accuracy of appearance reconstruction of shiny reflective surfaces.

We developed a method to measure the similarity of surface appearance using rotation invariant descriptors obtained by changing the DMD parameterization. We then calculate distance maps to extract the most salient features leading to an effective separation of surface defects. We identify relevant parameters from which controllers are able to decide on product conformity.

We propose orientation-preserving maps of slopes and curvatures for identifying and separating the periodic and aperiodic components of the surface. We are then able to make a geometric characterization of the detected surface defects or of the manufacturing process signature.

The results of this work make possible to help manufacturers in the control of surface appearance using a software called *MsaTool*<sup>®</sup> bringing together several modalities of our treatments.

**Keywords :** Surface quality, BRDF, RTI, Modal parameterization, Appearance defects, Salience, Curvatures